Библиотека
ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

В. Н. ВАВИН

ТРАНСФОРМАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ И ИХ ВТОРИЧНЫЕ ЦЕПИ



Библиотека
ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

Выпуск 461

В. Н. ВАВИН

ТРАНСФОРМАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ И ИХ ВТОРИЧНЫЕ ЦЕПИ

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ



МОСКВА «ЭНЕРГИЯ» 1977

6П2.1.081
В 12
УДК 621.314.222

Виктор Николаевич Бавин

Трансформаторы напряжения и их вторичные цепи

Редактор издательства **Э. К. Биленко**
Обложка художника **В. И. Карпова**
Технический редактор **М. П. Осипова**
Корректор **М. Г. Гулина**

ИБ № 380

Сдано в набор 21/I 1977 г. Подписано к печати 7/IV 1977 г. Т-08407
Формат 84×108¹/₃₂ Бумага типографская № 2
Усл. печ. л. 5,46 Уч.-изд. л. 5,77
Тираж 30 000 экз. Зак. 33 Цена 21 коп.

Издательство «Энергия», Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Вавин В. Н.

В 12 Трансформаторы напряжения и их вторичные цепи. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1977.

104 с. с ил. (Б-ка электромонтера. Вып. 461).

В книге даются основные сведения об устройстве, работе и погрешностях трансформаторов напряжения. Приводятся технические данные и примеры конструктивного выполнения, а также схемы включения трансформаторов напряжения и их вторичных цепей, принципы расчета цепей напряжения и способы их проверки.

Первое издание книги вышло в 1967 г. Второе издание существенно переработано в связи с переходом на новые принципы построения схем включения трансформаторов напряжения и схем их вторичных цепей и дополнено техническими данными новых трансформаторов напряжения, а также некоторыми рекомендациями по проверке цепей напряжения.

Книга рассчитана на электромонтеров, обслуживающих электрооборудование вторичных цепей.

В $\frac{30311-332}{051(01)-77}$ 59-77 6П2.1.081

1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ТРАНСФОРМАТОРАХ НАПРЯЖЕНИЯ

Назначение и принцип действия трансформатора напряжения. Трансформатор напряжения служит для понижения высокого напряжения, подаваемого в установках переменного тока на измерительные приборы и реле защиты и автоматики.

Для непосредственного включения на высокое напряжение измерительной и релейной аппаратуры потребовались бы очень громоздкие приборы и реле вследствие необходимости их выполнения с высоковольтной изоляцией. Изготовление и применение такой аппаратуры практически неосуществимо, особенно при напряжении 35 кВ и выше.

Применение трансформаторов напряжения позволяет использовать для измерения на высоком напряжении стандартные измерительные приборы, расширяя пределы измерения; обмотки реле, включаемых через трансформаторы напряжения, также могут иметь стандартные исполнения.

Кроме того, трансформатор напряжения изолирует (отделяет) измерительные приборы и реле от высокого напряжения, благодаря чему обеспечивается безопасность их обслуживания.

Трансформаторы напряжения широко применяются в электроустановках высокого напряжения; от их работы зависит точность электрических измерений и учета электроэнергии, а также надежность действия релейной защиты и противоаварийной автоматики.

Трансформатор напряжения по принципу выполнения ничем не отличается от силового понижающего трансформатора. Он состоит из магнитопровода, набранного из пластин листовой электротехнической стали, первичной обмотки и одной или двух вторичных обмоток. На рис. 1,*а* показана схема трансформатора напряжения с одной вторичной обмоткой. На первичную обмотку подается высокое напряжение U_1, а напряжение вторичной обмотки U_2 подведено к измерительному прибору.

Начала первичной и вторичной обмоток обозначены буквами A и a, а концы — X и x. Такие обозначения обычно наносятся на корпус трансформатора напряжения рядом с выводами его обмоток.

Отношение первичного номинального напряжения к вторичному номинальному напряжению называется *номинальным коэффициентом трансформации* трансформатора напряжения:

$$n_{\text{ном}}=U_{1\text{ном}}/U_{2\text{ном}}. \qquad (1)$$

При работе трансформатора напряжения без погрешностей его первичное и вторичное напряжения совпадают по фазе, как показано на рис. 1,*б*, и отношение их абсолютных значений равно $n_{\text{ном}}$. При коэффициенте трансформации $n_{\text{ном}}=1$ напряжение $U_2=U_1$ (рис. 1,*в*).

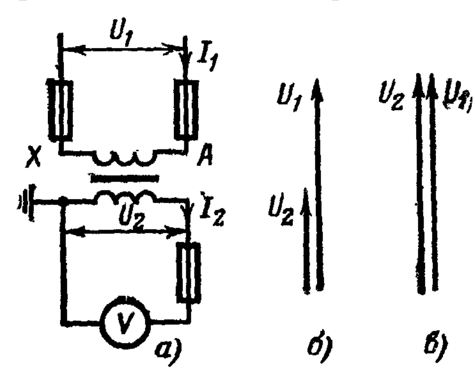


Рис. 1. Схема (*а*) и векторные диаграммы трансформатора напряжения при $n_{\text{ном}}>1$ (*б*) и $n_{\text{ном}}=1$ (*в*).

Трансформаторы напряжения с двумя вторичными обмотками предназначаются не только для питания измерительных приборов и реле, но и для работы в устройстве сигнализации замыканий на землю в сети с изолированной нейтралью или защиты от замыканий на землю в сети с заземленной нейтралью.

Схема трансформатора напряжения с двумя вторичными обмотками показана на рис. 2,*а*. Выводы второй (дополнительной) обмотки, используемой для сигнализации или защиты при замыканиях на землю, обозначены $a_{\text{д}}$ и $x_{\text{д}}$. На рис. 2,*б* приведена схема включения трех таких трансформаторов напряжения в трехфазной сети. Первичные и основные вторичные обмотки соединены в звезду. Нейтраль первичной обмотки заземлена. На измерительные приборы и реле от основных вторичных обмоток могут быть поданы три фазы и нуль. Дополнительные вторичные обмотки соединены по схеме разомкнутого треугольника. От них на устройства сигнализации или защиты подается сумма векторов фазных напряжений всех трех фаз.

При нормальной работе сети, в которой включен трансформатор напряжения, эта сумма равна нулю. Это видно из векторных диаграмм рис. 2,*в*, где $\dot{U}_A$, $\dot{U}_B$ и $\dot{U}_C$ — векторы фазных напряжений, приложенных к первичным обмоткам, а $\dot{U}_{aд}$, $\dot{U}_{bд}$ и $\dot{U}_{cд}$ — векторы напряжений на вторичных дополнительных обмотках (треугольник на рис. 1,*в*). Сумма векторов $\dot{U}_{aд}$, $\dot{U}_{bд}$ и $\dot{U}_{cд}$ получена путем их совмещения соответственно схеме соединения дополнительных обмоток, при этом принималось, что стрелки векторов как первичных, так и вторичных

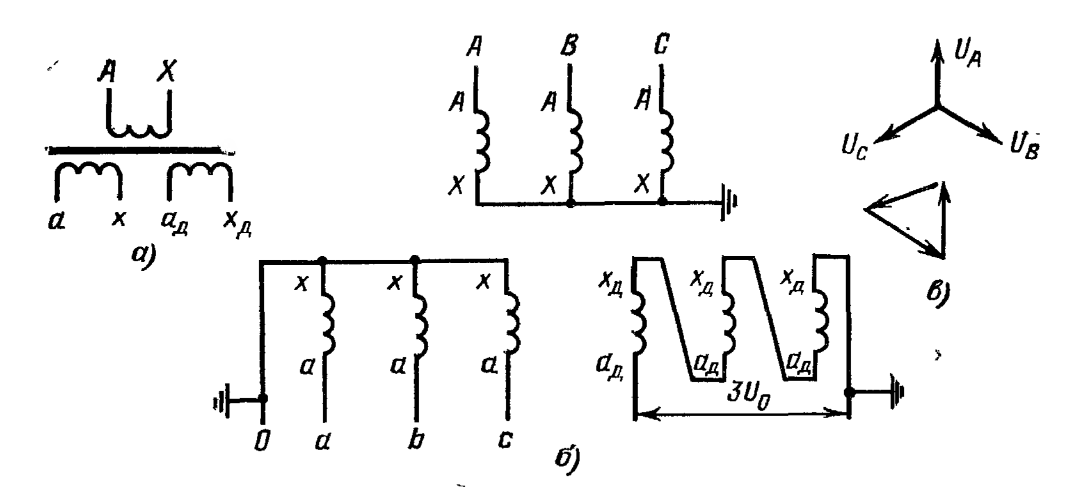


Рис. 2. Трансформатор напряжения с двумя вторичными обмотками.

напряжений соответствуют началам обмоток трансформатора. Результирующее напряжение $3U_0$ между концом обмотки фазы *с* и началом обмотки фазы *а* на диаграмме равно нулю.

В реальных условиях обычно на выходе разомкнутого треугольника имеется ничтожно малое напряжение небаланса, не превышающее 2—3% номинального напряжения. Этот небаланс создается всегда имеющимися незначительной несимметрией вторичных фазных напряжений и небольшим отклонением формы их кривой от синусоиды. Напряжение, обеспечивающее срабатывание реле, подключаемых к цепи разомкнутого треугольника, возникает только при замыканиях на землю со стороны первичной обмотки трансформатора напряжения. При этом векторная сумма фазных напряжений не равна нулю и согласно методу симметричных составляющих является утроенным *напряжением нулевой последовательности* $3U_0$. Выходные цепи разомкнутого треуголь-

ника, подаваемые на реле сигнализации или защиты, также обозначаются $3\dot{U}_0$ (рис. 2,*б*).

Наибольшее значение напряжение $3\dot{U}_0$ имеет при однофазном замыкании на землю. При этом следует иметь в виду, что максимальное значение напряжения $3U_0$ в сети с изолированной нейтралью значительно больше, чем в сети с заземленной нейтралью.

На рис. 3,*а* построен вектор $3\dot{U}_0$ при замыкании на землю фазы *A* в сети с заземленной нейтралью вблизи места установки трансформатора напряжения (при этом значение $3U_0$ наибольшее). Векторы $\dot{U}_B$ и $\dot{U}_C$ — фазные напряжения неповрежденных фаз, приложенные к первичным обмоткам трансформатора напряжения. В месте однофазного короткого замыкания (к. з.) напряжение поврежденной фазы равно нулю, и первичная обмотка трансформатора напряжения этой фазы закорочена. Поэтому вектор $\dot{U}_A$ на диаграмме отсутствует. Вектор $3\dot{U}_0$ получен в результате сложения векторов напряжения вторичных дополнительных обмоток фаз *B* и *C* (векторы $\dot{U}_{bд}$ и $\dot{U}_{cд}$), совпадающих по фазе с векторами $\dot{U}_B$ и $\dot{U}_C$.

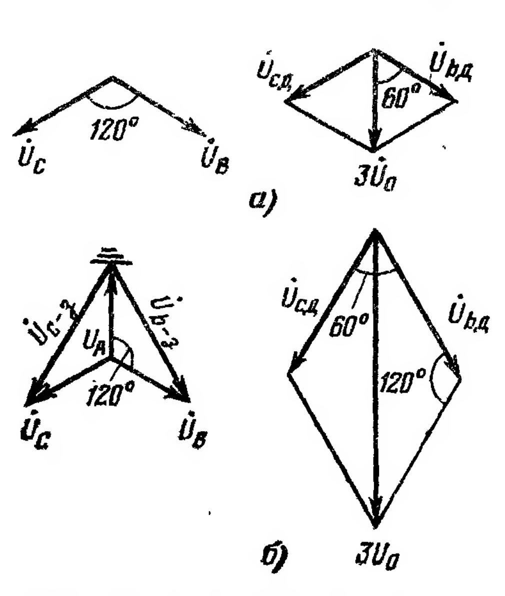


Рис. 3. Векторные диаграммы напряжений первичной и вторичной дополнительной обмоток при однофазном замыкании на землю.

Вектор $3\dot{U}_0$ делит угол 120° пополам, и в построенном параллелограмме образуются два равносторонних треугольника. Следовательно, напряжение $3U_0$ равно фазным напряжениям $U_{bд}$ и $U_{cд}$. Таким образом, в сети с заземленной нейтралью максимальное значение $3U_0$ равно фазному напряжению.

На рис. 3,*б* приведены векторные диаграммы при замыкании на землю фазы *A* в сети с изолированной нейтралью. При этом к. з. не возникает и векторы фазных напряжений сети $\dot{U}_A$, $\dot{U}_B$ и $\dot{U}_C$ остаются симметричными. Так как фаза *A* заземлена (условно показано на векторной диаграмме), напряжения фаз *B* и *C* относительно земли при этом равны линейным напряжениям. Эти

линейные напряжения $U_{B-з}$ и $U_{C-з}$ и будут подаваться на первичные обмотки фаз B и C трансформатора напряжения, поскольку его нейтраль заземлена. Напряжение на первичной обмотке фазы A трансформатора будет равно нулю, так как она закорочена. Вектор $3\dot{U}_0$ построен как сумма векторов напряжений $\dot{U}_{bд}$ и $\dot{U}_{cд}$, совпадающих по фазе с векторами напряжений первичных обмоток $\dot{U}_{B-з}$ и $\dot{U}_{C-з}$. Вектор $3\dot{U}_0$ делит пополам угол 60° и в построенном параллелограмме образуется два равных равнобедренных треугольника с углами при основании по 30°, откуда следует, что $3U_0 = \sqrt{3} U_{bд} = \sqrt{3} U_{cд}$. Так как напряжения $U_{bд}$, $U_{cд}$, равные в нормальном режиме фазным напряжениям (рис. 2,*в*), увеличились до линейных ($U_{bд} = U_{cд} = \sqrt{3} U_ф$), то $3U_0 = 3U_ф$, т. е. в сети с изолированной нейтралью максимальное значение $3U_0$ равно утроенному фазному напряжению.

Если напряжение на дополнительных вторичных обмотках в нормальном трехфазном режиме равно номинальному напряжению этих обмоток, то при возникновении однофазного замыкания на землю максимальное значение $3U_0$ в сети с заземленной нейтралью будет равно этому номинальному напряжению, а в сети с изолированной нейтралью — в 3 раза больше.

Погрешности трансформатора напряжения. Погрешности трансформатора напряжения обусловлены падениями напряжения в активном и индуктивном сопротивлениях первичной и вторичной обмоток от первичного и вторичного токов I_1 и I_2. Так как эти падения напряжения не совпадают по фазе с напряжениями $\dot{U}_1$ и $\dot{U}_2$, кроме погрешности напряжения возникает также угловая.

Погрешность напряжения чаще всего проявляется в некотором уменьшении значения U_2 (рис. 4,*а*). Однако возможны и такие случаи, когда погрешность по напряжению выражается в возрастании напряжения U_2 (рис. 4,*б*), например при вторичной нагрузке емкостного характера.

Угловая погрешность характеризуется углом δ между векторами напряжений U_1 и U_2.

Значения погрешностей зависят от вторичной нагрузки трансформатора напряжения. Чем она больше, тем больше вторичный и первичный токи и, следовательно, тем больше падения напряжения в сопротивлениях обмоток, вызывающие появление погрешностей.

Наименьшие погрешности у трансформатора напряжения бывают при работе на холостом ходу (без нагрузки). В этом случае они возникают вследствие падения напряжения в активном и индуктивном сопротивлениях первичной обмотки от тока холостого хода, создающего магнитный поток в сердечнике трансформатора. При этом вследствие отсутствия тока I_2 падение напряжения во вторичной обмотке равно нулю и напряжение U_2 равно э. д. с. вторичной обмотки E_2 (рис. 5). Для снижения погрешностей трансформатора напряжения их мощность выбирается значительно выше мощности вторичной нагрузки. С учетом этого трансформатор напряжения, как правило, работает в режиме, близком к холостому ходу, когда ток I_1 лишь незначительно больше тока намагничивания I_0. Вследствие этого падения напряжения в его обмотках незначительны.

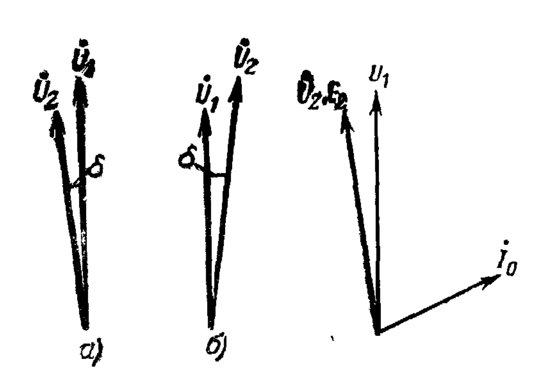


Рис. 4. Векторные диаграммы напряжений трансформатора напряжения с $n_{ном}=1$, работающего с погрешностями напряжения и угловой.
а — $U_1>U_2$; *б* — $U_2>U_1$.

Рис. 5. Векторная диаграмма трансформатора напряжения с $n_{ном}=1$, работающего на холостом ходу.

Ток намагничивания в свою очередь по возможности снижают путем расчетного выбора магнитодвижущей силы (м. д. с.) I_0w_1, обеспечивающего работу стали магнитопровода в области ее наибольшей магнитной проницаемости, а также путем применения высоколегированной стали. Кроме того, для снижения индуктивного сопротивления первичной и вторичной обмоток стараются расположить их по возможности ближе одну к другой. Уменьшение тока намагничивания и индуктивного сопротивления обмоток уменьшает падение напряжения в них и, следовательно, способствует снижению погрешностей.

Для дополнительного снижения погрешности напряжения применяется также витковая коррекция — изменение числа витков первичной обмотки, чем компенсируется уменьшение напряжения U_2 при работе трансформатора напряжения на вторичную нагрузку.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ТОЧНОСТИ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ И К ВЫПОЛНЕНИЮ ИХ ВТОРИЧНЫХ ЦЕПЕЙ

Классы точности и соответствующие им допустимые погрешности. Согласно ГОСТ на трансформаторы напряжения погрешность напряжения выражается в процентах и определяется по формуле

$$f_U = \frac{n_{ном}U_2 - U_1}{U_1} 100. \qquad (2)$$

При $n_{ном}U_2 > U_1$ погрешность напряжения положительна (рис. 4,*б*), а при $n_{ном}U_2 < U_1$ — отрицательна (рис. 4,*а*).

Угловая погрешность δ согласно ГОСТ выражается в минутах и считается положительной, если вторичное напряжение опережает по фазе первичное (рис. 4,*а*), или отрицательной, если вторичное напряжение отстает от первичного (рис. 4,*б*). Так как угол δ обычно очень мал, то, выражая его в радианах, можно считать, что

$$\delta \approx \operatorname{tg} \delta. \qquad (3)$$

Трансформаторы напряжения должны соответствовать установленным ГОСТ классам точности, характеризуемым предельно допустимыми значениями погрешностей при нормированных значениях первичного напряжения и мощности вторичной нагрузки.

Цифра, обозначающая класс точности, соответствует предельно допустимому значению погрешности напряжения.

Предельно допустимые погрешности, установленные ГОСТ для различных классов точности, приведены ниже.

Класс точности	Погрешность	
	напряжения, ±%	угловая, ±мин
0,2	0,2	10
0,5	0,5	20
1	1	40
3	3	Не нормируется

Класс точности 0,2 нужен при питании от трансформатора напряжения расчетных счетчиков, устанавливаемых на мощных генераторах и межсистемных линиях электропередачи. Трансформаторы напряжения, питающие расчетные счетчики других присоединений и измерительные приборы классов 1 и 1,5, должны иметь класс

точности 0,5. Для наиболее распространенных указывающих измерительных приборов класса 2,5 должен обеспечиваться класс точности 1 трансформатора напряжения, и только как исключение допускается класс 3. Для релейной защиты требуется класс точности 3 трансформатора напряжения.

При питании вторичных нагрузок разного характера (например, релейной защиты и расчетных счетчиков) от одного и того же трансформатора напряжения он должен работать в наиболее высоком классе точности, требуемом подключенной к нему аппаратурой.

Для каждого класса точности в соответствии с ГОСТ устанавливается номинальная мощность трансформатора напряжения $S_{ном}$, при которой его погрешности при номинальном первичном напряжении не превышают указанных выше значений. *Так как с увеличением вторичной нагрузки погрешности возрастают, то более высокому классу точности соответствует меньшая номинальная мощность.*

Обычно для каждого трансформатора напряжения устанавливаются два или три класса точности и две или три соответствующие им номинальные мощности. Это обеспечивает возможность более полного использования его мощности, когда не требуется работа в высоком классе точности. Для дополнительных обмоток всегда устанавливается только класс точности 3.

Кроме номинальных мощностей, каждый трансформатор напряжения имеет максимальную мощность, которую он может длительно выдавать без недопустимого перегрева обмоток, работая вне классов точности.

Трансформаторы напряжения согласно ГОСТ должны обеспечивать при частоте 50 Гц работу в установленном классе точности при вторичной нагрузке, имеющей мощность в пределах $(0{,}25—1)S_{ном}$ при номинальном первичном напряжении $U_{1ном}$. При отклонении напряжения от номинального не более чем на $\pm10\%$ мощность трансформатора напряжения вместо $S_{ном}$ следует считать равной

$$S_1 = S_{ном}(U_1/U_{1ном})^2,$$

т. е. соответствующей сопротивлению номинальной вторичной нагрузки:

$$z_{ном} = \frac{U_{1ном}}{I_{1ном}} = \frac{U^2_{1ном}}{S_{ном}} = \frac{U^2_1}{S_1}.$$

Потеря напряжения во вторичных цепях. На точность работы измерительных приборов и реле, кроме погрешностей трансформаторов напряжения, влияет падение напряжения от тока вторичной обмотки I_2 в сопротивлении вторичных цепей, вносящее дополнительные погрешности по напряжению и углу.

На векторной диаграмме (рис. 6) U_2 — вектор напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора напряжения, а $U_{н}$ — на измерительных приборах и реле. Падение напряжения в активном сопротивлении проводов, соединяющих трансформатор напряжения с приборами и реле, показано вектором $I_2 r_{пр}$, совпадающим по фазе с током I_2. Индуктивное сопротивление вторичных цепей напряжения обычно незначительно и поэтому не принимается во внимание.

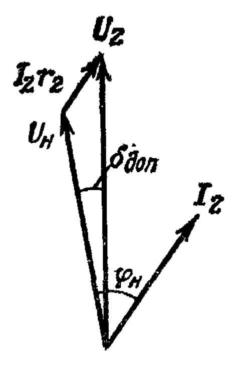


Рис. 6. Векторная диаграмма вторичных цепей трансформатора напряжения.

Разность абсолютных значений напряжений по концам соединительных проводов называется потерей напряжения. Потерю напряжения принято выражать, %:

$$\Delta U = \frac{U_2 - U_{н}}{U_2} 100. \qquad (4)$$

Потеря напряжения во вторичной цепи трансформатора напряжения представляет собой *отрицательную дополнительную погрешность* в измерении напряжения. Таким образом, дополнительная погрешность напряжения $f_{U доп} = -\Delta U\%$.

Дополнительная угловая погрешность равна углу $\delta_{доп}$ между векторами $U_{ном}$ и U_2 (рис. 6). Дополнительные погрешности считаются допустимыми, если потери напряжения во вторичных цепях не превышают установленных максимальных значений. Согласно ПУЭ сечения жил кабелей в цепях напряжения должны выбираться так, чтобы потеря напряжения в сопротивлении проводов от трансформатора напряжения до расчетных счетчиков была не более 0,5%, до щитовых приборов — не более 1,5%, до реле защиты и автоматики — не более 3%. Это является основным требованием к выполнению вторичных цепей трансформаторов напряжения по условию обеспечения необходимой точности работы измеритель-

ной и релейной аппаратуры. При питании расчетных счетчиков межсистемных линий электропередачи от трансформаторов напряжения класса точности 0,5 к целям напряжения этих счетчиков предъявляются еще более высокие требования — потеря напряжения в этих цепях не должна превышать 0,25%.

Значения падения напряжения и дополнительной угловой погрешности, соответствующие предельно допустимым потерям напряжения при вторичной нагрузке с $\cos\varphi_н=0{,}8$, приведены ниже.

ΔU, %	I_2r_2, %	$\delta_{доп}$, мин
0,25	0,3	6
0,5	0,6	10
1,5	1,85	40
3	3,7	70

При потере напряжения до 1,5% ее значение незначительно отличается от значения падения напряжения.

3. ИСПОЛНЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ И ИХ ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ

Общие сведения о конструктивном выполнении трансформаторов напряжения. Наибольшее распространение имеют однофазные трансформаторы, выпускаемые на рабочие напряжения от 380 В до 500 кВ. Широко распространены также трехфазные трансформаторы напряжения, которые в Советском Союзе выпускаются на рабочие напряжения до 18 кВ.

Однофазные и трехфазные трансформаторы напряжения могут иметь одну или две вторичные обмотки.

К первичной обмотке трансформатора напряжения с двумя вторичными обмотками, включенной на напряжение фаза — земля в нормальном режиме, приложено фазное напряжение. При замыкании на землю в сети с изолированной нейтралью напряжение фаза — земля может возрасти до линейного (рис. 3,*б*). Поэтому трансформаторы напряжения с двумя вторичными обмотками, предназначенные для использования в сети с изолированной нейтралью и имеющие номинальное напряжение, равное фазному напряжению сети, рассчитываются на длительную работу под линейным напряжением.

Трансформаторы напряжения с двумя вторичными обмотками, выпускаемые для работы в сети с заземлен-

ной нейтралью, должны без повреждений выдерживать в течение 30 с повышение первичного фазного напряжения до $1{,}5U_{ф.ном}$.

Конструктивные размеры и масса трансформаторов напряжения определяются не мощностью, как у силовых трансформаторов, а в основном объемом изоляции первичной обмотки и размерами ее выводов высокого напряжения. Это объясняется тем, что при малой мощности трансформатора напряжения, работающего, как правило, в режиме, близком к холостому ходу, объем изоляции высокого напряжения значительно превосходит требуемый по мощности объем меди первичной обмотки. Для обеспечения необходимой механической прочности первичной обмотки приходится завышать и сечение ее провода. Увеличение объема обмотки высокого напряжения против необходимого по мощности, естественно, вызывает и увеличение размеров магнитопровода. В результате размеры и масса трансформатора напряжения, выполненного на более высокое напряжение, всегда больше, чем трансформатора той же конструкции и мощности с меньшим номинальным напряжением первичной обмотки.

Для уменьшения размеров и массы трансформаторов напряжения 110 кВ и выше применяется каскадное (ступенчатое) исполнение их. При этом рабочее напряжение распределяется между каскадами и изоляция каждого из них выполняется на более низкое напряжение. С той же целью на высоком напряжении применяются трансформаторы напряжения на 10—15 кВ, включаемые через емкостный делитель напряжения.

Трансформаторы напряжения с номинальным напряжением от 380 В до 6 кВ имеют исполнение с сухой изоляцией (обмотки выполняются проводом марки ПЭЛ и пропитываются асфальтовым лаком). У трансформаторов напряжения 10—500 кВ изоляция масляная (магнитопровод погружен в трансформаторное масло). Имеются также исполнения трансформаторов напряжения на 2—6 кВ с масляной изоляцией и на 6—24 кВ с сухой (литой) изоляцией.

Для уменьшения влияния атмосферных перенапряжений на витки верхних (входных) слоев первичной обмотки они защищаются во всех трансформаторах напряжения 3 кВ и выше электростатическими экранами, соединенными с линейными вводами. Экран выполняется

в виде металлической полосы, охватывающей обмотку с небольшим зазором между его краями (во избежание образования короткозамкнутого витка).

Однофазные трансформаторы напряжения. Изоляция первичной обмотки и ее обоих выводов выполняется на полное рабочее напряжение только у трансформаторов с одной вторичной обмоткой, которые могут включаться на междуфазное напряжение. Трансформаторы напряжения с двумя вторичными обмотками, включаемые на

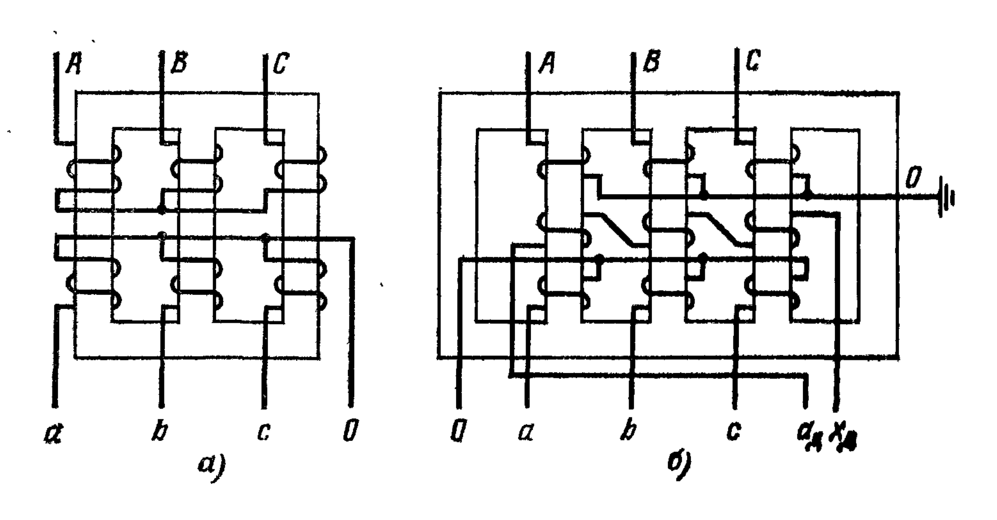


Рис. 7. Схема трехфазных трансформаторов напряжения.
а — с трехстержневым магнитопроводом; *б* — с пятистержневым магнитопроводом.

напряжение фаза — земля, имеют только один вывод первичной обмотки, рассчитанный на полное рабочее напряжение; второй ее конец выводится через ввод низкого напряжения. Участок первичной обмотки, близкий к заземленному выводу, обычно выполняется с пониженной изоляцией относительно земли и вторичной обмотки.

Трехфазные трансформаторы напряжения. На рис. 7,*а* приведена схема трансформатора напряжения (с одной вторичной обмоткой на каждой фазе) с трехстержневым магнитопроводом. Первичные обмотки (выводы *A*, *B*, *C*) соединены в звезду, благодаря чему к каждой из них приложено фазное напряжение. Вторичные обмотки также соединены в звезду, и их начала выведены на зажимы *a*, *b*, *c*, а нейтраль — на зажимы *0*.

На рис. 7,*б* показана схема трехфазного трансформатора напряжения с двумя вторичными обмотками на

каждой фазе Основные вторичные обмотки соединены в звезду и имеют выводы a, b, c, 0. Дополнительные обмотки всех трех фаз соединены последовательно (как на рис. 2,*б*), и цепь $3U_0$ выведена на зажимы $a_д$, $x_д$. Для обеспечения действия реле сигнализации замыканий на землю, включаемого на напряжение $3U_0$, нулевая точка первичных обмоток должна быть заземлена.

Трансформаторы с двумя вторичными обмотками выполняются на пятистержневых магнитопроводах (рис. 7,*б*). Крайние стержни, свободные от обмоток, предназначены для замыкания магнитного потока несимметрии, пропорционального напряжению $3U_0$ и возникающего при однофазных замыканиях на землю, когда первичная обмотка одной из фаз закорочена и вследствие этого магнитный поток в ее стержне отсутствует, а магнитные потоки в двух других стержнях возрастают в $\sqrt{3}$ раз, так же как фазные напряжения $U_{bд}$ и $U_{cд}$ на векторной диаграмме рис. 3,*б*.

При применении вместо пятистержневого трехстержневого магнитопровода магнитный поток несимметрии мог бы замыкаться только по воздуху и через кожух трансформатора, т. е. по пути с бо́льшим магнитным сопротивлением, что привело бы к значительному возрастанию токов намагничивания неповрежденных фаз и опасному перегреву их первичных обмоток. Поэтому во избежание повреждений трансформаторов с трехстержневыми магнитопроводами заземление нулевой точки их первичных обмоток не допускается. Их первичные и вторичные обмотки выполняются на фазное напряжение; нуль первичной обмотки не выводится.

Каскадные трансформаторы напряжения. Принцип выполнения поясняется схемой трансформатора, состоящего из двух каскадов (*I* и *II*), приведенной на рис. 8. Каждый каскад представляет собой трансформатор с номинальным напряжением, равным половине рабочего напряжения, которое приложено к выводам *A* и *X* обмотки ВН. Трансформатор каждого из каскадов размещается в фарфоровом кожухе, залитом трансформаторным маслом, причем кожух первого каскада устанавливается непосредственно на кожухе второго, вследствие чего ввод высокого напряжения *A* имеет двойную изоляцию относительно земли.

Сердечник первого каскада соединен с концом обмотки ВН, что позволяет выполнить ее изоляцию на поло-

вину рабочего напряжения с ослаблением в слоях, ближних к концу.

Вторичная обмотка низкого напряжения с выводами *a*, *x* расположена на заземленном сердечнике нижнего второго каскада.

Для распределения вторичной нагрузки, отдаваемой обмоткой НН между трансформаторами нижнего и верхнего каскадов, на каждом из них имеются связующие обмотки *P*, соединенные между собой. Для первого каскада обмотка *P* является вторичной, а для второго — дополнительной первичной. Благодаря наличию связующих обмоток нагрузка делится между каскадами пополам. Половина нагрузки трансформируется в обмотку НН из обмотки ВН, а вторая половина из обмотки *P*.

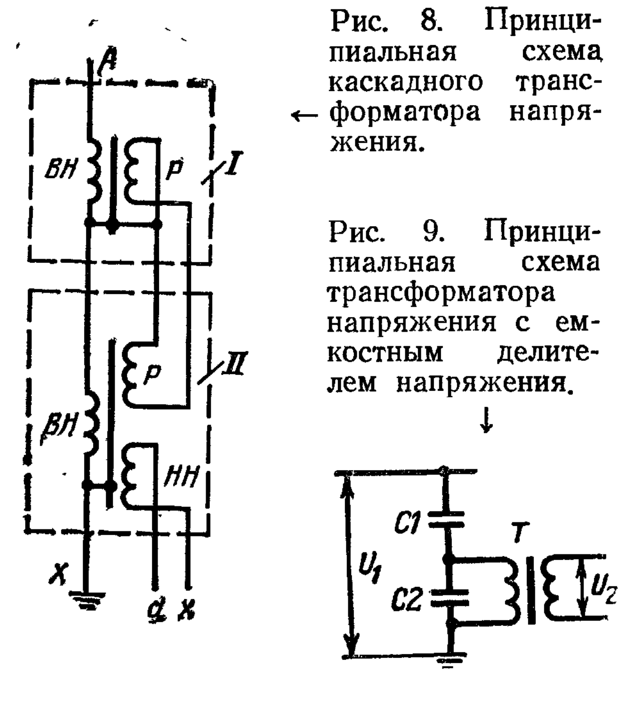


Рис. 8. Принципиальная схема каскадного трансформатора напряжения. ←

Рис. 9. Принципиальная схема трансформатора напряжения с емкостным делителем напряжения. ↓

Трансформаторы напряжения с емкостными делителями напряжения. На рис. 9 показан емкостный делитель напряжения, состоящий из двух последовательно включенных конденсаторов *C1* и *C2*. Напряжение между конденсаторами распределяется пропорционально их емкостным сопротивлениям (или обратно пропорционально емкостям). Трансформатор напряжения *T* выполняется на номинальное напряжение, равное части рабочего напряжения U_1, приложенной к конденсатору *C2*.

В качестве емкостного делителя напряжения обычно используются конденсаторы связи, устанавливаемые для осуществления высокочастотной защиты или связи. При таком способе включения трансформатора напряжения достигается существенное его удешевление, так как сам трансформатор выполняется на напряжение, значительно меньшее измеряемого рабочего напряжения.

4. ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Основные технические данные, характеризующие трансформаторы напряжения отечественного производства, приведены в табл. 1.

Номинальные напряжения обмоток. Согласно ГОСТ [7] *номинальными напряжениями обмоток называются напряжения, указанные на щитке трансформатора для его первичной и каждой из вторичных обмоток. Номинальным напряжением трансформатора называется номинальное напряжение его первичной обмотки.*

Для основной вторичной обмотки трансформаторов с номинальным напряжением, соответствующим линейному напряжению сети, установлено номинальное напряжение 100 В. Соответственно для трансформаторов с фазным номинальным напряжением основной вторичной обмотки $100/\sqrt{3}$ В при включении их по схеме звезда — звезда вторичное линейное напряжение, соответствующее номинальному, будет тоже 100 В.

Номинальное напряжение дополнительных вторичных обмоток устанавливается таким образом, чтобы максимальное значение напряжения $3U_0$ (на разомкнутом треугольнике) при однофазном замыкании на землю в сети, когда линейное напряжение соответствует номинальному напряжению трансформатора напряжения, было 100 В.

Так как первичные обмотки трансформаторов напряжения с двумя вторичными обмотками включаются на фазное напряжение, напряжения их вторичных обмоток в нормальном режиме тоже фазные (рис. 2,*в*). При однофазном замыкании на землю в сети с заземленной нейтралью $3U_{0макс}=U_ф$ (рис. 3,*а*), а в сети с изолированной нейтралью $3U_{0макс}=3U_ф$ (рис. 3,*б*). Соответственно для дополнительных обмоток трансформаторов напряжения, предназначенных для сети с заземленной нейтралью, установлено $U_{ном}=100$ В, а для сети с изолированной нейтралью $U_{ном}=100/3$ В.

Напряжение короткого замыкания. Приведенные в табл. 1 значения $u_к$% представляют собой напряжения короткого замыкания, выраженные в процентах номинального напряжения трансформаторов напряжения. Напряжение короткого замыкания $u_к$ — это *напряжение на первичной обмотке при закороченных выводах вто-*

Основные технические данные трансформаторов напряжения отечественного производства

Тип	Номинальное напряжение обмоток, кВ			Номинальная мощность, В·А, для классов точности				Максимальная мощность, В·А	$u_к$*, %
	ВН	НН (основной)	НН (дополнительной)	0,2	0,5	1	3		
НОС-0,5	0,38	0,1	—	—	25	50	100	200	4,4
НОС-0,5	0,5	0,1	—	—	25	50	100	200	4,2
НОМ-6	3	0,1	—	—	30	50	150	240	3,58
НОМ-6	6	0,1	—	—	50	75	200	400	6,15
НОМ-10	10	0,1	—	—	75	150	300	640	6,4
НОМ-15	13,8	0,1	—	—	75	150	300	640	3,6
НОМ-15	15,75	0,1	—	—	75	150	300	640	4,63
НОМ-15	18	0,1	—	—	75	150	300	640	4,5
НОМ-35	35	0,1	—	—	150	250	600	1200	3,87
НОЛ.08-6	6	0,1	—	30	50	75	200	400	3,47
НОЛ.08-10	10	0,1	—	50	75	150	300	640	4,05
НТС-0,5	0,38	0,1	—	—	50	75	200	400	3,76
НТС-0,5	0,5	0,1	—	—	50	75	200	400	3,76
НТМК-6-48	3	0,1	—	—	50	75	200	400	2,08
НТМК-6-48	6	0,1	—	—	75	150	300	640	3,02
НТМК-10	10	0,1	—	—	120	200	500	960	3,07
НТМИ-6	3	0,1	0,1/3	—	50	75	200	400	3,01
НТМИ-6	6	0,1	0,1/3	—	75	150	300	640	5,23
НТМИ-10	10	0,1	0,1/3	—	120	200	500	960	5
НТМИ-18	13,8	0,1	0,1/3	—	120	200	500	960	4,08
НТМИ-18	15,75	0,1	0,1/3	—	120	200	500	960	4,32
НТМИ-18	18	0,1	0,1/3	—	120	200	500	960	4,32
ЗНОЛ.09-6	$6/\sqrt{3}$	$0,1/\sqrt{3}$	0,1/3**	30	50	75	200	400	3,55
ЗНОЛ.09-10	$10/\sqrt{3}$	$0,1/\sqrt{3}$	0,1/3**	50	75	150	300	640	4,8
ЗНОЛ.06-6	$6/\sqrt{3}$	$0,1/\sqrt{3}$	0,1/3**	30	50	75	200	400	3,55
ЗНОЛ.06-10	$10/\sqrt{3}$	$0,1/\sqrt{3}$	0,1/3**	50	75	150	300	640	4,8
ЗНОЛ.06-15	$13,8/\sqrt{3}$	$0,1/\sqrt{3}$	0,1/3**	50	75	150	300	640	5,12
ЗНОЛ.06-15	$15,75\sqrt{3}$	$0,1/\sqrt{3}$	0,1/3**	50	75	150	300	640	5,12
ЗНОЛ.06-20	$18/\sqrt{3}$	$0,1/\sqrt{3}$	0,1/3**	50	75	150	300	640	5,02
ЗНОЛ.06-20	$20/\sqrt{3}$	$0,1/\sqrt{3}$	0,1/3**	50	75	150	300	640	5,02
ЗНОЛ.06-24	$24/\sqrt{3}$	$0,1/\sqrt{3}$	0,1/3**	50	75	150	300	640	5,03
ЗНОМ-15-72	$6/\sqrt{3}$	$0,1/\sqrt{3}$	0,1/3	—	50	75	200	400	3,42
ЗНОМ-15- 2	$10/\sqrt{3}$	$0,1/\sqrt{3}$	0,1/3	—	75	150	300	640	4,63
ЗНОМ-15-72	$13,8/\sqrt{3}$	$0,1/\sqrt{3}$	0,1/3	60	90	150	300	640	4,57
ЗНОМ-15-72	$15,75/\sqrt{3}$	$0,1/\sqrt{3}$	0,1/3	60	90	150	300	640	5,1
ЗНОМ-20	$18/\sqrt{3}$	$0,1/\sqrt{3}$	0,1/3	60	90	150	300	640	5,6
ЗНОМ-20	$20/\sqrt{3}$	$0,1/\sqrt{3}$	0,1/3	—	75	150	300	640	5,25
ЗНОМ-24	$24/\sqrt{3}$	$0,1/\sqrt{3}$	0,1/3	—	150	250	600	980	4,4
ЗНОМ-35-65	$35/\sqrt{3}$	$0,1/\sqrt{3}$	0,1/3	—	150	250	600	1200	6
НКФ-110-57	$110/\sqrt{3}$	$0,1/\sqrt{3}$	0,1	—	400	600	1200	2000	4,05
НКФ-110-58***	$66/\sqrt{3}$	$0,1/\sqrt{3}$	0,1/3	—	400	600	1200	2000	3,55
НКФ-110-58***	$110/\sqrt{3}$	$0,1/\sqrt{3}$	0,1/3	—	400	600	1200	2000	4,43
НКФ-220-58	$150/\sqrt{3}$	$0,1/\sqrt{3}$	0,1	—	400	600	1200	2000	3,83

Тип	Номинальное напряжение, обмоток, кВ			Номинальная мощность, В·А, для классов точности				Максимальная мощность, В·А	$u_к$*, %
	ВН	НН (основной)	НН (дополнительной)	0,2	0,5	1	3		
НКФ-220-58	$220/\sqrt{3}$	$0,1/\sqrt{3}$	0,1	—	400	600	1200	2000	4,13
НКФ-330	$330/\sqrt{3}$	$0,1/\sqrt{3}$	0,1	—	400	600	1200	2000	4,35
НКФ-400	$400/\sqrt{3}$	$0,1/\sqrt{3}$	0,1	—	—	500	1000	2000	5,45
НКФ-500	$500/\sqrt{3}$	$0,1/\sqrt{3}$	0,1	—	—	500	1000	2000	4,48
НДЕ-500****	$500/\sqrt{3}$	$0,1/\sqrt{3}$	0,1	—	300	500	1000	1200	1,9
НДЕ-750****	$750/\sqrt{3}$	$0,1/\sqrt{3}$	0,1	—	300	500	1000	1200	1,9

* Приведены значения $u_к$ % между обмотками ВН и НН (основной), отнесенные к максимальной мощности

** Может быть выполнена на 0,1 кВ (например, для использования в цепях управления возбуждением генераторов).

*** Предназначены для сетей с изолированной нейтралью.

**** $u_к$ % соответствует активному сопротивлению (индуктивное компенсируется емкостью делителя напряжения).

Примечание. Мощность, указанная для трансформаторов напряжения типов ЗНОЛ, ЗНОМ, НКФ и НДЕ является суммарной мощностью основной и дополнительной вторичных обмоток.

ричной основной обмотки при прохождении по ней номинального тока, соответствующего максимальной мощности трансформатора.

Величины $u_к$ можно принимать и для дополнительных обмоток, которые обычно имеют такие же геометрические размеры и одинаковое расположение с основными обмотками.

Трансформаторы типа ЗОМ. Кроме трансформаторов напряжения для питания автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) генераторов и синхронных компенсаторов выпускаются вспомогательные однофазные трансформаторы типа ЗОМ с двумя вторичными обмотками. Конструктивно они аналогичны трансформаторам напряжения типа ЗНОМ, но для них не установлен класс точности, погрешности их не нормируются и несколько выше предусмотренных ГОСТ для класса 3.

Основные технические данные трансформаторов ЗОМ приведены в табл. 2, 3.

Как правило, основные и дополнительные обмотки соединяются в звезду. Вторичная нагрузка при этом включается на линейное напряжение.

Таблица 2

Номинальные данные вторичных обмоток трансформаторов типа ЗОМ всех исполнений

Обмотка	$U_{ном}$, В	$S_{ном}$, В·А	$I_{ном}$, А
Основная	$100/\sqrt{3}$	75	1,3
Дополнительная	127—100	850	6,7—8,75

Примечание. Мощность основной и дополнительной обмоток трансформаторов типа ЗОМ-1/15 соответствует условию их неодновременной работы.

Таблица 3

Номинальные напряжения и сопротивления короткого замыкания трансформаторов типа ЗОМ

Тип	$U_{ном}$, В	$u_к^*$, %	
		ВН-НН$_{осн}$	ВН-НН$_{доп}$
ЗОМ-1/15	$6000/\sqrt{3}$	1,65	7,55
	$10\,000/\sqrt{3}$	1,69	8,05
	$13\,800/\sqrt{3}$	1,615	7,2
	$15\,750/\sqrt{3}$	1,71	8,22
	$18\,000/\sqrt{3}$	2,18	8,41
ЗОМ-1/20	$20\,000/\sqrt{3}$	2,14	8,15
ЗОМ-1/24	$24\,000/\sqrt{3}$	0,94	4,46

* Отнесены к мощности соответствующих обмоток НН.

Регуляторы возбуждения обычно имеют номинальное напряжение 173 В и подключаются к дополнительной обмотке. Основная обмотка используется для питания реле защиты и автоматики с номинальным напряжением 100 В.

5. ПРИМЕРЫ КОНСТРУКТИВНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Трансформатор напряжения типа НОС-0,5. На рис. 10 показан внешний вид сухого трансформатора типа НОС-0,5 на 500 В для внутренней установки. Магнитопровод *1* — броневого типа (трехстержневой с размеще-

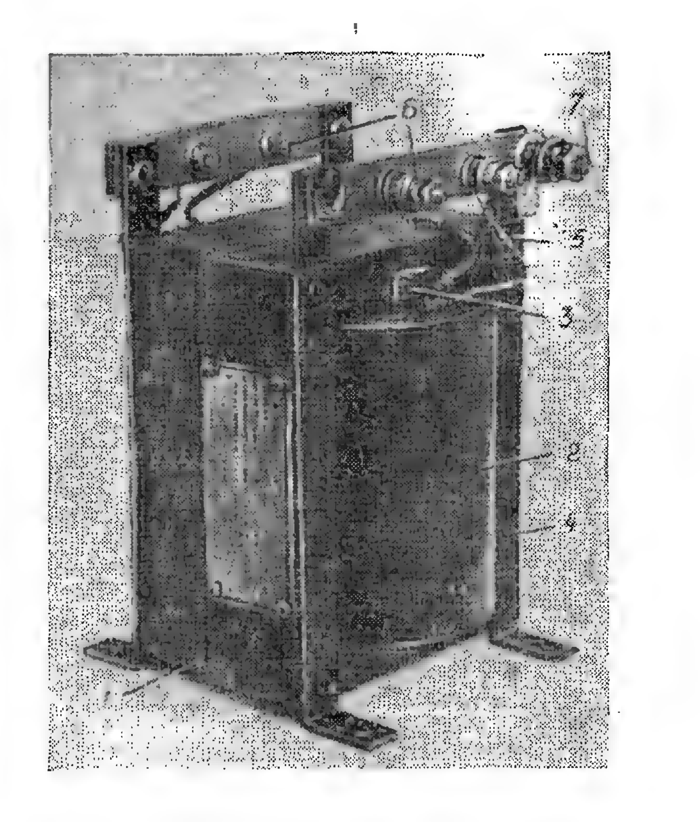


Рис. 10. Трансформатор напряжения типа НОС-0,5.

Рис. 11. Трансформатор напряжения типа НОМ-15.

нием обмоток только на среднем стержне). Пластины магнитопровода стянуты прессующими угольниками *4* с помощью развальцованных трубок *5*, пропущенных через отверстия сердечника. Трубки изолированы от магнитопровода кабельной бумагой. Первичная и вторичная многослойные обмотки *2* пропитаны лаком. В трансформаторе типа НОС-0,5 ближе к сердечнику расположена обмотка ВН, а поверх ее обмотка НН. Обмотки закреплены деревянными клиньями *3*. Концы обмоток выведены к двум гетинаксовым платам с выводами *6*, около которых нанесены белой эмалью их обозначения *А*, *Х* и *а*, *х*. Для заземления магнитопровода имеется специальный болт *7*.

Для крепления трансформатора на месте установки у прессующих угольников *4* внизу имеются лапы с монтажными отверстиями.

Трансформатор напряжения типа НОМ-15. На рис. 11 показана активная часть однофазного масляного трансформатора напряжения типа НОМ-15 для внутренней установки.

Двухстержневой магнитопровод стянут прессующими угольниками *2* с помощью изолированных кабельной бумагой стяжных болтов *3* и жестко прикреплен к плоской крышке бака. Обмотки ВН и НН распределены по обоим стержням сердечника. Обмотка НН расположена ближе к сердечнику — внутри обмотки ВН; обе ее части соединены последовательно. Концы обмотки НН присоединены к шпилькам вводов *5*. Обмотка ВН состоит из четырех последовательно соединенных секций *1*. На каждом стержне сердечника секции обмотки ВН отделены одна от другой дисками из электрокартона. Каждая секция обмотки ВН сверху покрыта электростатическим экраном, соединенным с верхним выводом данной секции. Концы обмотки ВН выведены через стержни вводов высокого напряжения *4*. При изготовлении трансформатора обмотки пропитываются лаком. Для подъема трансформатора и выемки из бака его активной части на крышке закреплены скобы *6*.

При сборке трансформатора его крышка крепится к баку болтами. Между крышкой и верхней кромкой бака прокладывается уплотняющее кольцо из маслоупорной резины. Во избежание выпадения этой прокладки внутрь бака на его верхней кромке с внутренней стороны имеется выступающий бортик.

Для заливки в трансформатор масла на крышке имеется болт с отверстием для «дыхания» (на рис. 11 не виден). В нижней части бака имеется закрытое болтом отверстие для слива и взятия пробы масла. Уровень масла в баке должен быть на 15—30 мм ниже крышки, чтобы обеспечивалась возможность свободного увеличения объема масла при повышении температуры трансформатора во время его работы.

Для заземления трансформатора на баке имеется болт, отмеченный знаком заземления.

Однофазные масляные трансформаторы напряжения типов ЗНОМ-15 и ЗНОМ-20. У трансформаторов напряжения указанных типов магнитопровод — броневого типа, а обмотки слоевые. Обмотка НН расположена ближе к сердечнику, а поверх нее намотана обмотка ВН, внутренний конец которой заземляется. Обмотка ВН защищена электростатическим экраном.

Трансформаторы напряжения типов ЗНОМ-15 и ЗНОМ-20, а также вспомогательные трансформаторы типов ЗОМ-1/15 и ЗОМ-1/20 аналогичны по конструкции и предназначены для установки в комплектных токопроводах мощных генераторов. На рис. 12 приведен эскиз установки трансформатора напряжения типа ЗНОМ-20 в токопроводе.

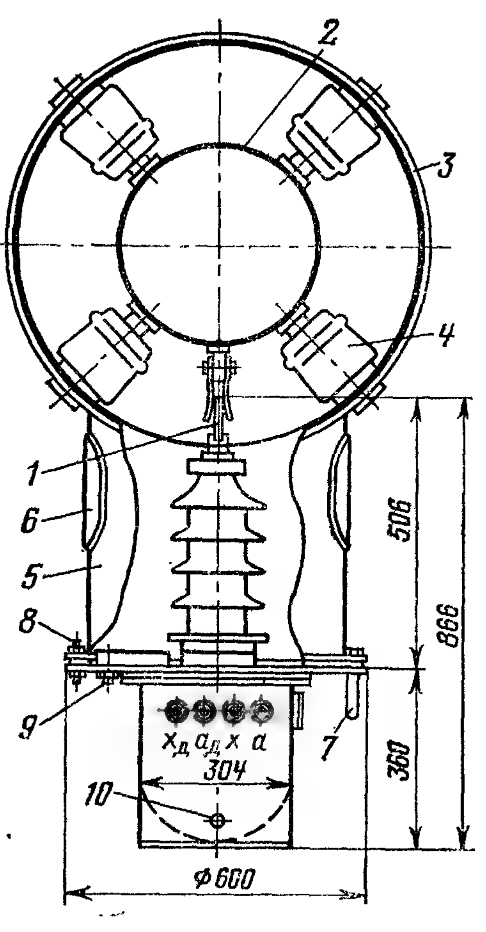


Рис. 12. Установка трансформатора напряжения типа ЗНОМ-20 в комплектном токопроводе мощного генератора.

Трансформатор имеет ножевой контакт *1* на вводе обмотки ВН. Этот ножевой контакт входит в пружинный контакт, закрепленный непосредственно на трубчатой шине *2* токопровода, установленной в кожухе токопровода *3* с помощью опорных изоляторов *4*. От кожуха

токопровода ответвляется патрубок *5* со смотровыми люками *6*. К борту этого патрубка болтами *8* прикреплена круглая крышка трансформатора напряжения. Таким образом, ввод высокого напряжения трансформатора находится в закрытом отростке кожуха токопровода. Для обеспечения правильного сочленения ножевого контакта ввода высокого напряжения и пружинного контакта токопровода при установке трансформатора напряжения на бортике патрубка *5* имеются три направляющих стержня *7*, входящих в специальные отверстия в крышке трансформатора.

В связи с тем что крышка трансформатора напряжения находится внутри токопровода, зажимы вторичных обмоток выведены на боковую стенку бака, имеющего прямоугольную форму. Зажимы обмоток НН закрываются отдельным кожухом. Заземленный конец первичной обмотки выведен на ввод низкого напряжения, расположенный с противоположной стороны бака. Дыхательное отверстие выведено через специальный болт *9* под крышку трансформатора. В нижней части бака расположена пробка *10* для слива масла. С противоположной стороны бака находится заземляющий болт. Отверстие для доливки масла находится на крышке трансформатора (на рисунке не показано). Уровень масла, так же как и в трансформаторе НОМ-15, должен быть ниже крышки на 15—30 мм.

Так как трансформатор напряжения находится в сильном магнитном поле, создаваемом током, проходящим по шине токопровода, его бак во избежание нагрева вихревыми токами сделан из немагнитной стали.

Трехфазный масляный трансформатор напряжения типа НТМК-10. Магнитопровод трансформатора типа НТМК-10 трехстержневой. На каждом стержне помещены обмотки ВН и НН одной из фаз. Обмотки каждой фазы выполнены аналогично описанным выше обмоткам каждого стержня трансформатора типа НОМ-15 (рис. 11). Схема соединения обмоток — звезда — звезда с выведенной нулевой точкой.

В трансформаторе типа НТМК-10 применена коррекция угловой погрешности, которая осуществлена путем включения последовательно с обмотками ВН компенсационных обмоток, расположенных на стержнях других фаз. На рис. 13,*а* показана схема включения основных и компенсационных обмоток ВН. Эта схема обеспечива-

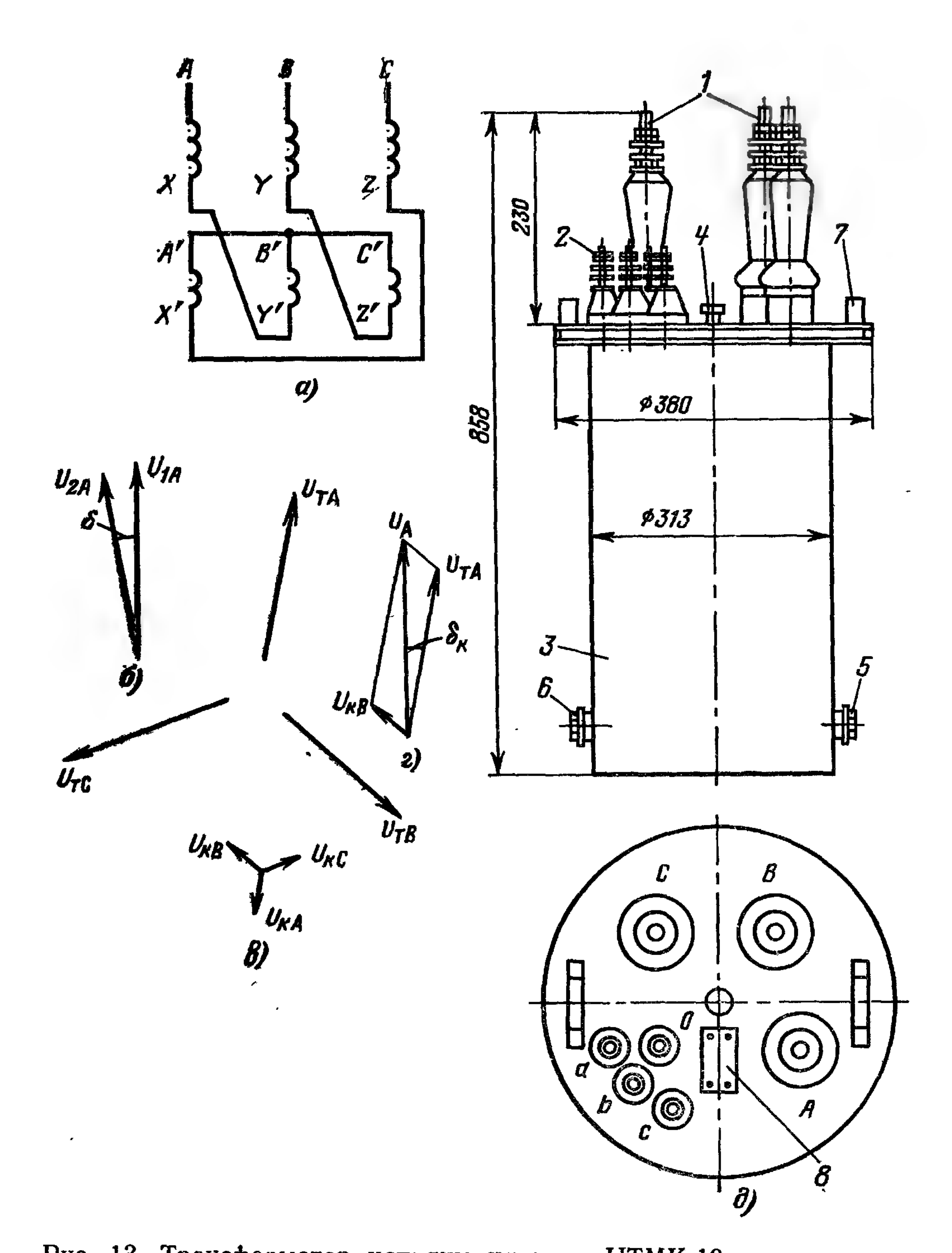


Рис. 13. Трансформатор напряжения типа НТМК-10.

а — схема включения обмоток ВН; *б* — векторная диаграмма первичного и вторичного напряжений фазы *А* при отсутствии коррекции угловой погрешности; *в* — векторная диаграмма напряжений основных и компенсационных обмоток ВН; *г* — векторная диаграмма напряжений фазы *А*; *д* — общий вид трансформатора; *1* — вводы ВН; *2* — вводы НН; *3* — бак; *4* — пробка для заливки масла и дыхания; *5* — пробка для спуска масла; *6* — болт для заземления; *7* — подъемные скобы; *8* — щиток с паспортными данными.

ет коррекцию положительной угловой погрешности (рис. 13,*б*). Компенсационные обмотки *A′—X′*, *B′—У′*, *C′—Z′* имеют примерно в 250 раз меньше витков, чем основные обмотки ВН *A—X*, *B—Y*, *C—Z*. Соответственно магнитными потоками стержней фаз *A*, *B*, *C* в них наводятся э. д. с. приблизительно в 250 раз меньше, чем в основных обмотках. Соотношение напряжений основных и компенсационных обмоток при работе трансформатора можно считать таким же.

На рис. 13,*в* приведены векторные диаграммы напряжений основных ($U_{\text{т}A}$, $U_{\text{т}B}$, $U_{\text{т}C}$) и компенсационных ($U_{\text{к}A}$, $U_{\text{к}B}$, $U_{\text{к}C}$) обмоток. В каждой фазе они взаимно сдвинуты на 180°, так как при их построении принималось, что стрелки векторов напряжений основных обмоток соответствуют их началам, обозначенным буквами *A*, *B*, *C*, а стрелки векторов напряжений компенсационных обмоток — концам *X′*, *Y′*, *Z′*. Векторы фазных напряжений сети, приложенных к трансформатору напряжения, могут быть получены как сумма векторов напряжений основных и включенных последовательно с ними компенсационных обмоток. На рис. 13,*г* построен вектор напряжения сети для фаз *A* сложением векторов напряжений $U_{\text{т}A}$ и $U_{\text{к}B}$, включенных последовательно, основной обмотки фазы *A* и компенсационной обмотки фазы *B*. Из диаграммы рис. 13,*г* видно, что вектор $U_{\text{т}A}$ смещен в сторону отставания от вектора напряжения U_A, приложенного к фазе *A* трансформатора на угол компенсации $\delta_{\text{к}}$. На такой же угол сместится и вектор вторичного напряжения, вследствие чего он приблизится к вектору U_A и уменьшится угловая погрешность. Таким образом, коррекция угловой погрешности достигается смещением векторов напряжения первичной и вторичной обмоток на угол компенсации $\delta_{\text{к}}$, имеющий постоянное значение.

Следует иметь в виду, что для обеспечения правильной коррекции угловой погрешности необходимо при включении трансформатора соблюдать порядок чередования фаз, указанный на обозначениях его вводов ВН. Если порядок чередования фаз не соблюдается, компенсационные обмотки будут не уменьшать, а увеличивать угловую погрешность. Так, если в схеме рис. 14,*а* поменять местами фазы *B* и *C*, то последовательно с основной обмоткой ВН фазы *A* окажется включенной компенсационная обмотка фазы *C*, а не *B*, что приведет

к смещению вектора $\dot{U}_{\text{тA}}$ относительно вектора $\dot{U}_A$ в сторону опережения, а не отставания, т. е. к увеличению положительной угловой погрешности трансформатора напряжения. Трансформатор напряжения НТМК-10 выпускается для внутренней установки. Его общий вид показан на рис. 13,*д*.

Трехфазный трансформатор напряжения типа НТМИ-18. Масляный трансформатор для внутренней установки выпускается для использования в сети с изолированной нейтралью. Он имеет пятистержневой магнитопровод и две вторичные обмотки. Одна соединена в звезду с выведенным нулем, а вторая (дополнительная) — в разомкнутый треугольник (для осуществления контроля изоляции).

Конструктивное выполнение обмоток каждой фазы такое, как на стержнях трансформатора типа НОМ-15 (см. выше). Внешний вид трансформатора типа НТМИ-18 показан на рис. 14. Подъемные кольца на крышке предназначены только для выемки активной части трансформатора. Ввиду большой массы трансформатора (300 кг) для подъема его в собранном виде к боковым стенкам бака приварены два крюка.

Для доливки и слива масла имеются пробки на крышке и в нижней части бака. Верхняя пробка имеет дыхательное отверстие. Уровень масла в баке должен быть на 15—30 мм ниже крышки. В середине стенки в нижней части бака виден болт для заземления.

Каскадный трансформатор напряжения типа НКФ-110. Масляный трансформатор типа НКФ-110 в фарфоровом кожухе выпускается для наружной установки. Он состоит из двух каскадов, выполненных на одном общем магнитопроводе. На рис. 15,*а* приведена его схема. Обмотка ВН разделена на две одинаковые последовательно соединенные секции, представляющие собой первый и второй каскады. На начало *А* обмотки ВН первого каскада подается высокое напряжение, конец *X* обмотки второго каскада заземляется. Магнитопровод соединен с серединой обмотки ВН и находится под напряжением, равным половине рабочего напряжения. Благодаря этому изоляция обмотки ВН каждого каскада может быть выполнена на половину рабочего напряжения, что существенно уменьшает размеры и массу трансформатора по сравнению с трансформатором обычного (не каскадного) исполнения.

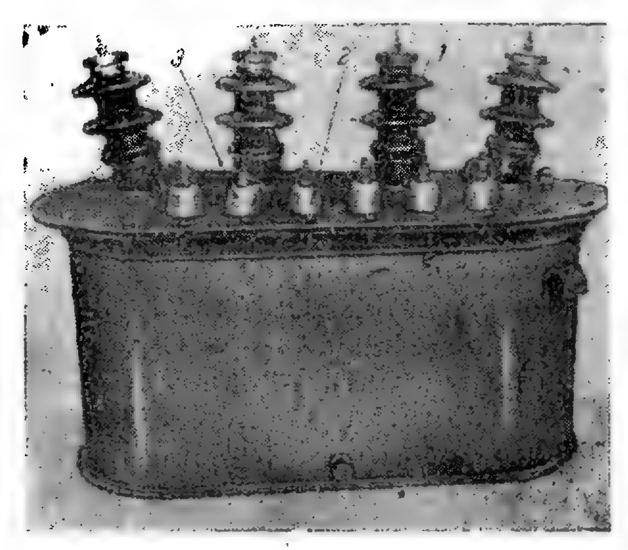
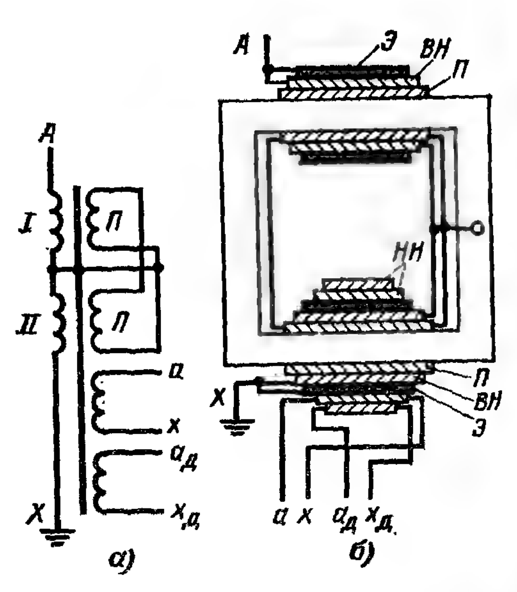


Рис. 14. Внешний вид трансформатора напряжения типа НТМИ-18.

1 — вводы ВН; *2* — четыре ввода основной обмотки НН; *3* — два ввода дополнительной обмотки НН.

Обмотки каскадов трансформатора размещаются на противоположных стержнях двухстержневого магнитопровода. При этом, чтобы снизить индуктивное сопро-



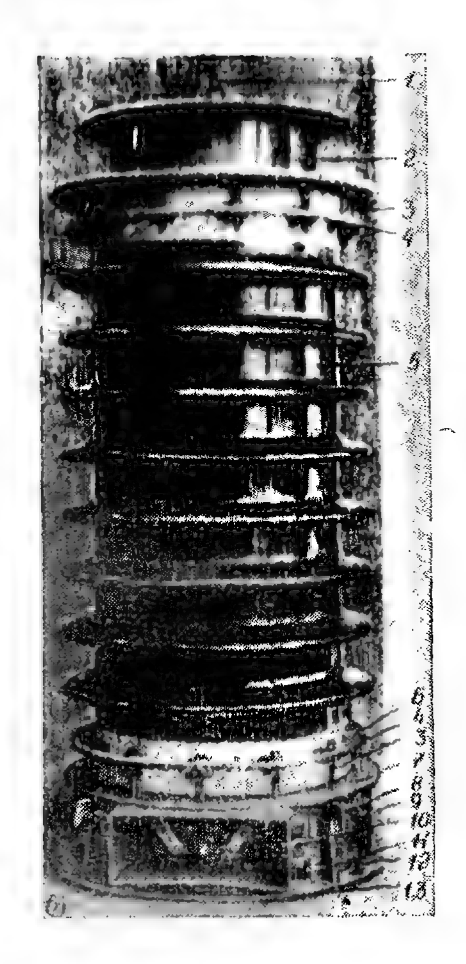


Рис. 15. Трансформатор напряжения типа НКФ-110.

1 — ввод ВН; *2* — маслорасширитель; *3* — болты крепления фарфоровой покрышки к плите и основанию; *4* — ограничительное кольцо; *5* — фарфоровая покрышка; *6* — кулачки алюминиевые; *7* — плита основания; *8* — крюки для подъема трансформатора; *9* — подставка; *10* — коробка выводов; *11* — сальник для проводов; *12* — болт заземления; *13* — рама.

тивление обмотки ВН первого каскада, удаленной от обмоток НН, на обоих каскадах имеются выравнивающие обмотки *П*, соединенные параллельно. Через выравнивающие обмотки часть нагрузки, потребляемой обмотками *НН*, передается от второго на первый каскад. Обмотка *П* в первом каскаде является вторичной, а во втором — дополнительной первичной. Работа этой каскадной схемы аналогична описанной выше для схемы, показанной на рис. 8 и состоящей из двух трансформаторов.

Расположение обмоток на сердечнике трансформатора типа НКФ-110 показано на рис. 15,*б*. В обоих каскадах ближними к сердечнику намотаны соединенные с ним выравнивающие обмотки *П*, которые выполнены на 115 В. Поверх них намотаны обмотки ВН, также соединенные с сердечником. Обмотки ВН защищены электростатическими экранами. В первом каскаде экран соединен с вводом ВН *А*, а во втором — заземлен. Поверх заземленного второго экрана каскада намотаны основная и дополнительная обмотки НН. Обмотки пропитаны лаком.

Катушки закреплены на стержнях магнитопровода деревянными клиньями, одновременно прессующими его листы. Ярма сердечника (вертикальные части сердечника на рис. 15,*б*) стянуты толстыми изоляционными планками из древесно-слоистого пластика. Эти планки выступают вниз далеко за пределы сердечника и используются для его крепления к плите основания трансформатора. Болты, стягивающие планки, проходят через отверстия в сердечнике и изолированы от него бумажно-бакелитовыми трубками.

На рис. 15,*в* показан общий вид трансформатора напряжения типа НКФ-110.

Активная часть трансформатора размещена внутри фарфоровой покрышки *5*, соединенной болтами *3* внизу с плитой *7* стальной подставки *9* сварной конструкции, а вверху — с маслорасширителем *2*.

Соединения фарфора покрышки со сталью плиты и расширителя выполнены через уплотняющие прокладки из маслоупорной резины. Покрышка и половина расширителя заполнены трансформаторным маслом.

Ввод ВН *1* проходит через крышку расширителя. Заземляемый конец *X* обмотки ВН и концы обмоток НН a—x, $a_д$—$x_д$ выведены в коробку выводов *10*.

При установке трансформатор крепится к опорной конструкции болтами, пропускаемыми через монтажные отверстия в раме *13* подставки *9*.

Каскадный трансформатор напряжения типа НКФ-220. Трансформатор на 220 кВ для наружной установки состоит из двух блоков, каждый из которых представляет собой двухкаскадный трансформатор напряжения типа НКФ-110. Блоки размещаются один над другим и скрепляются болтами. В каждом блоке дополнены связующие обмотки *Р* (выполнены на 120 В), необходимые для распределения нагрузки обмоток НН, находящихся в нижнем блоке между нижним и верхним блоками (см. описание схемы, приведенной на рис. 8).

Схема трансформатора типа НКФ-220 приведена на рис. 16,*а*. Верхний и нижний блоки соединяются между собой двумя перемычками, одна из которых общая для обмоток ВН и *Р*. Верхний блок состоит из каскадов *I* и *II*, а нижний — из каскадов *III* и *IV*.

На рис. 16,*б* показан общий вид трансформатора типа НКФ-220. Подставка *1* имеет четыре выступающие лампы *2* для крепления трансформатора, обеспечивающие большую базу для устойчивости по сравнению с трансформатором типа НКФ-110.

Полости верхнего и нижнего блоков не сообщаются между собой и каждый из них имеет свой маслорасширитель с маслоуказателем. Вместо дыхательных отверстий на каждом блоке установлен влагопоглотитель *11*, представляющий собой сосуд, заполненный влагопоглощающим составом — силикагелем. При понижении уровня масла в расширителе воздух из атмосферы попадает в него через влагопоглотитель. После прохода через силикагель воздух осушается. Во избежание быстрого увлажнения силикагеля наружным воздухом в нижней части влагопоглотителя имеется так называемый масляный затвор, который представляет собой небольшую залитую маслом полость, расположенную на пути атмосферного воздуха так, что воздух может поступать во влагопоглотитель только проходя через слои масла. Силикагель по мере насыщения его влагой должен заменяться; при насыщении он изменяет цвет с голубого на розовый, что можно видеть через стеклянный цилиндр, в котором он находится.

Подставка верхнего блока представляет собой каркас из угловой стали. Внутри этой подставки находятся пе-

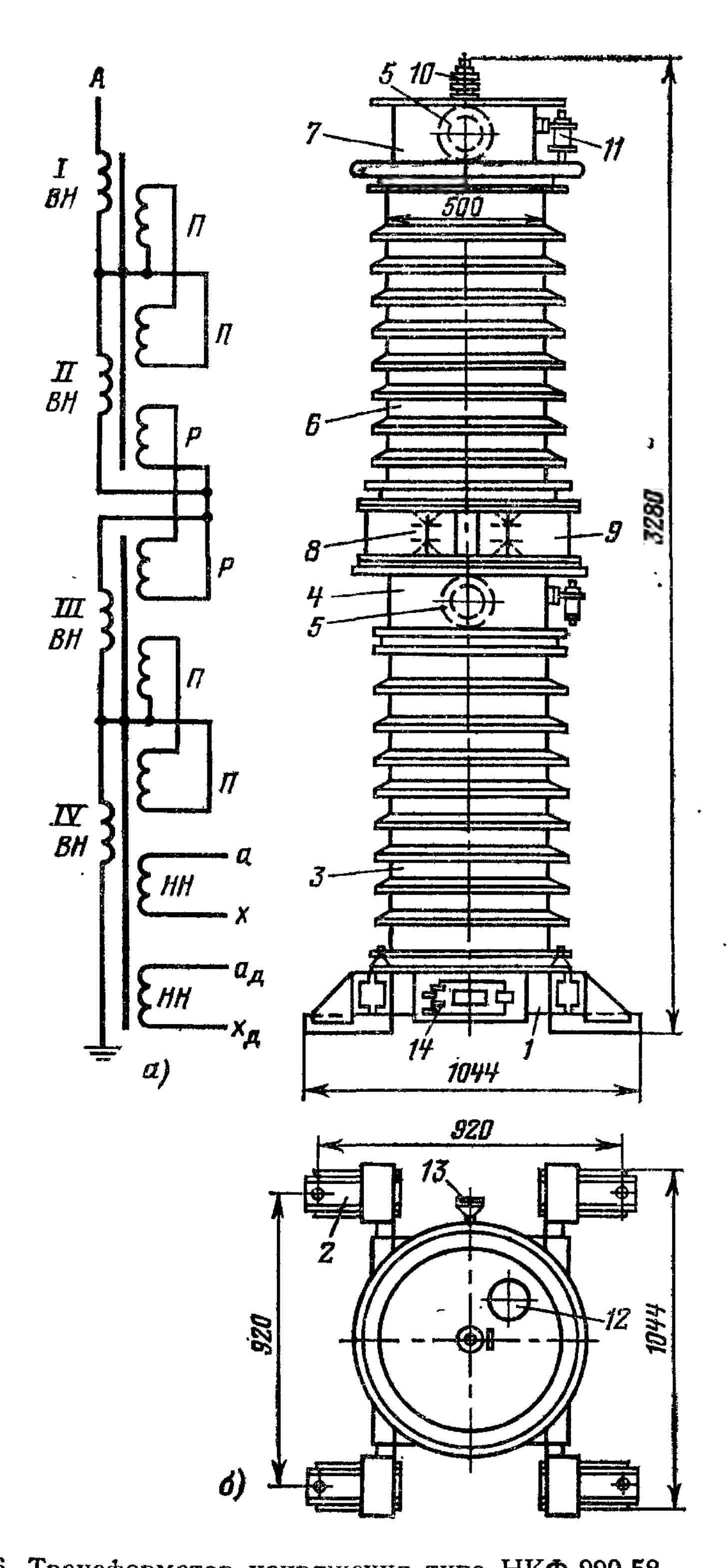


Рис. 16. Трансформатор напряжения типа НКФ-220-58.

1 — подставка; *2* — лапы для крепления; *3* — нижний блок трансформатора; *4* — маслорасширитель нижнего блока; *5* — маслоуказатель; *6* — верхний блок; *7* — расширитель верхнего блока; *8* — перемычки между блоками; *9* — съемный кожух; *10* — ввод-ВН; *11* — влагопоглотитель; *12* — фланец для заливки масла; *13* — кран для слива масла; *14* — коробка выводов НН.

ремычки *8*, соединяющие верхний и нижний блоки. Эти перемычки присоединяются к стержням проходных изоляторов на дне верхнего и на расширителе нижнего блоков. Подставка верхнего блока закрывается съемным кожухом *9*, защищающим ее внутреннюю часть от атмосферных осадков и пыли.

Трансформатор напряжения типа НДЕ-500 с емкостным делителем напряжения выполнен по схеме, приведенной на рис. 17. Емкостный делитель напряжения со-

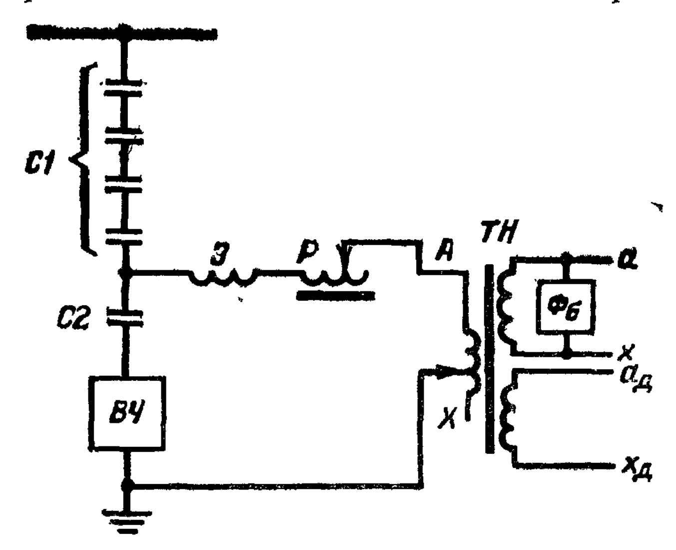


Рис. 17. Схема трансформатора напряжения типа НДЕ-500.

стоит из конденсаторов связи *C1* и отбора мощности *C2*. Он подключается непосредственно к линии. В цепи конденсатора отбора мощности включена аппаратура высокочастотной связи или защиты.

Во избежание шунтирования высокочастотной аппаратуры трансформатором напряжения в цепи его первичной обмотки включен высокочастотный заградитель *З*, который не пропускает в нее токи высокой частоты. Заградитель настраивается на рабочую частоту высокочастотного канала.

Емкость *C1* состоит из трех конденсаторов связи типа СМР-166/$\sqrt{3}$-0,014, а в качестве *C2* применен конденсатор типа ОМР-15-0,107.

При включении трансформатора напряжения по схеме, показанной на рис. 9, он работал бы с большими погрешностями из-за значительного падения напряжения в реактивном сопротивлении емкости *C1*. Поэтому в цепи

первичной обмотки трансформатора напряжения включен реактор *Р*, компенсирующий емкостное сопротивление делителя напряжения. В первичной обмотке трансформатора *ТН* и в обмотке реактора *Р* предусмотрена ступенчатая регулировка числа витков для приведения напряжения на вторичной обмотке в соответствии с требованиями класса точности и подбора индуктивности реактора; последнее необходимо в связи с относительно большим разбросом емкостей конденсаторов. Такой подбор должен производиться как при изготовлении трансформатора напряжения, так и в случае замены какого-либо конденсатора. В результате компенсации емкостного сопротивления в цепи первичной обмотки трансформатора *ТН* остается только ее активное сопротивление.

Реактор *Р* и трансформатор *ТН* встраиваются в общий бак, заполненный маслом. Первичное номинальное напряжение трансформатора *ТН* $U_{1тн}=12$ кВ.

При работе трансформатора *ТН* на холостом ходу возникают явления феррорезонанса, характеризующиеся скачкообразными изменениями тока. Это приводит к резким повышениям напряжения и искажению формы кривой вторичного напряжения (на зажимах a—x и $a_д$—$x_д$), которая в этом случае существенно отличается от синусоиды.

Для предотвращения таких искажений и колебаний напряжения к выводам a—x основной вторичной обмотки подключается противорезонансный балластный фильтр $Ф_б$.

6. СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Основные особенности схем. Схемы включения трансформаторов напряжения должны выполняться с учетом реальных условий их работы. *Применение и способы выполнения защиты от повреждений в первичных и вторичных цепях* зависят от исполнения, места установки и назначения трансформатора напряжения.

В цепи первичной обмотки трансформаторов напряжения до 35 кВ, как правило, устанавливаются предохранители. Назначение этих предохранителей — обеспечивать сохранение в работе шин или других первичных цепей, к которым подключен трансформатор напряжения при к. з. на его ошиновке или вводах ВН. Ток к. з.

при повреждениях в цепи вторичной обмотки и даже на ее выводах во многих случаях имеет значение, недостаточное для сгорания этих предохранителей, вследствие чего сам трансформатор напряжения ими не защищается.

В тех случаях, когда возникновение к. з. в цепи первичной обмотки маловероятно или последствия такого к. з. не представляют особой опасности для электроснабжения потребителей, предохранители на стороне ВН трансформатора напряжения не устанавливаются. Так, в комплектных токопроводах мощных генераторов трансформаторы напряжения включаются без предохранителей (рис. 12), поскольку при этом разделение отдельных фаз практически исключает возникновение к. з. на ошиновке. При установке трансформатора напряжения на каком-либо одном присоединении, имеющем надежный резерв (например, на трансформаторе, работающем параллельно с другими), в ряде случаев он также включается без предохранителей, так как повреждение в цепи этого трансформатора напряжения приведет к отключению только одного присоединения без прекращения питания его нагрузки.

Допускается также включение без предохранителей на шины КРУ 6—10 кВ однофазных трансформаторов напряжения с литой изоляцией (типа ЗНОЛ), поскольку при их повреждении маловероятно возникновение к. з. на шинах.

На напряжение 110 кВ и выше трансформаторы напряжения включаются без предохранителей. Как показал опыт эксплуатации, это не приводит к существенному снижению надежности электроустановок, так как повреждения трансформаторов напряжения происходят очень редко.

Следует, однако, учитывать возможность повреждения трансформаторов напряжения типа НКФ 220—500 кВ после их отключения воздушными выключателями вследствие возникновения феррорезонанса в цепи, содержащей индуктивное сопротивление трансформатора напряжения (это индуктивное сопротивление нелинейное, так как оно быстро снижается при насыщении стали магнитопровода) и емкостное сопротивление внешних цепей.

Феррорезонанс возникает потому, что после отключения воздушных выключателей трансформатор напря-

жения не отделяется от сети, а остается включенным через емкость конденсаторов, шунтирующих отделители этих выключателей.

Как показали проводившиеся ВНИИЭ исследования, феррорезонанс возможен как на частоте 50 Гц, так и на пониженных частотах (субгармониках). В последнем случае он возникает в контуре, образуемом индуктивностью трансформатора напряжения и шунтирующей его емкостью ошиновки.

Явления феррорезонанса, сопровождавшегося опасными повышением напряжения и возрастанием тока в обмотках трансформатора напряжения, наблюдались на трансформаторах напряжения 500 и 220 кВ и возможны также на трансформаторах напряжения 330 кВ.

Для предотвращения феррорезонанса рекомендуется включать трансформаторы напряжения типа НКФ 220—500 кВ в такие точки первичной схемы, где они будут всегда зашунтированы большой емкостью или малым индуктивным сопротивлением, т. е. непосредственно на линии или параллельно силовым трансформаторам или автотрансформаторам. При включении трансформаторов напряжения типа НКФ 220—500 кВ на шины следует при выводе в ремонт этих шин отключать трансформатор напряжения разъединителем непосредственно перед снятием напряжения с шин воздушными выключателями. Включение разъединителя трансформатора напряжения должно производиться только после постановки шин под напряжение. При действии защиты шин целесообразно производить автоматическое отключение разъединителя трансформатора напряжения в случаях неуспешного действия АПВ шин (например, от реле запрета АПВ в схеме защиты шин).

Для защиты трансформаторов напряжения от повреждения при к. з. во вторичных цепях применяют предохранители или автоматы. Предохранители могут устанавливаться только на трансформаторах напряжения, не питающих быстродействующие устройства релейной защиты, подверженные неправильным действиям (ложным срабатываниям) при обрыве цепей напряжения. При наличии таких устройств для защиты трансформатора напряжения должны применяться автоматы. Это необходимо для обеспечения эффективного действия специальных блокировок, устанавливаемых в отдельных комплектах быстродействующих защит для предотвра-

щения их ложного срабатывания при нарушении исправности вторичных цепей напряжения, так как предохранители могут сгорать недостаточно быстро.

По сравнению с предохранителями, кроме более быстрого действия, автоматы обладают большей надежностью, обеспечивают возможность быстрого восстановления питания цепей напряжения и их блок-контакты могут использоваться для сигнализации о нарушении исправности этих цепей. Поэтому автоматы находят широкое применение и в тех случаях, когда допустима установка предохранителей.

Они должны включаться во все незаземленные провода, соединяющие трансформатор напряжения со вторичными цепями. Исключение составляет лишь цепь $3U_0$ (см. рис. 2,*б*), в которую защитные аппараты включаются не всегда. Так, у трансформаторов напряжения в системе с заземленной нейтралью, например в сетях 110 кВ, замыкание в ней не опасно для трансформатора напряжения: в нормальном режиме ток в цепи $3U_0$ отсутствует (напряжение $3U_0 \approx 0$), а в аварийном режиме ток может проходить лишь кратковременно (пока защита отключает к. з.).

В то же время на трансформаторах напряжения, работающих в сетях с изолированной нейтралью, в цепи $3U_0$ необходимо устанавливать защиту во избежание повреждения трансформатора напряжения, у которого эта цепь оказалась закороченной при устойчивом однофазном замыкании на землю на стороне высшего напряжения.

В связи с тем что отдельные участки вторичных цепей трансформаторов напряжения 110 кВ и выше часто имеют большую протяженность (например, цепи синхронизации на электростанциях), чувствительность автоматов, защищающих трансформаторы напряжения, при к. з. в конце этих участков, как правило, недостаточна. Для ликвидации таких к. з. в цепях удаленных нагрузок устанавливаются неселективные (с автоматами в цепях вторичных обмоток трансформаторов напряжения) автоматы.

Устройства блокировки защиты при повреждениях в цепях напряжения существенно влияют на выполнение защиты и схемы включения трансформаторов напряжения 35 кВ и выше. Они выпускаются отечественной промышленностью в виде комплектных реле, устанавливае-

мых на панелях блокируемых защит. На рис. 18,*а* и *б* приведены схемы комплектов блокировок, выполняемых на принципе нарушения равновесия фазных напряжений при обрывах во вторичных цепях напряжения.

В нормальном трехфазном режиме векторная сумма фазных напряжений равна нулю, так как их векторы как бы взаимно уравновешиваются. При этом в комплекте типа КРБ-11 (рис. 18,*а*) токи в фазах, проходя-

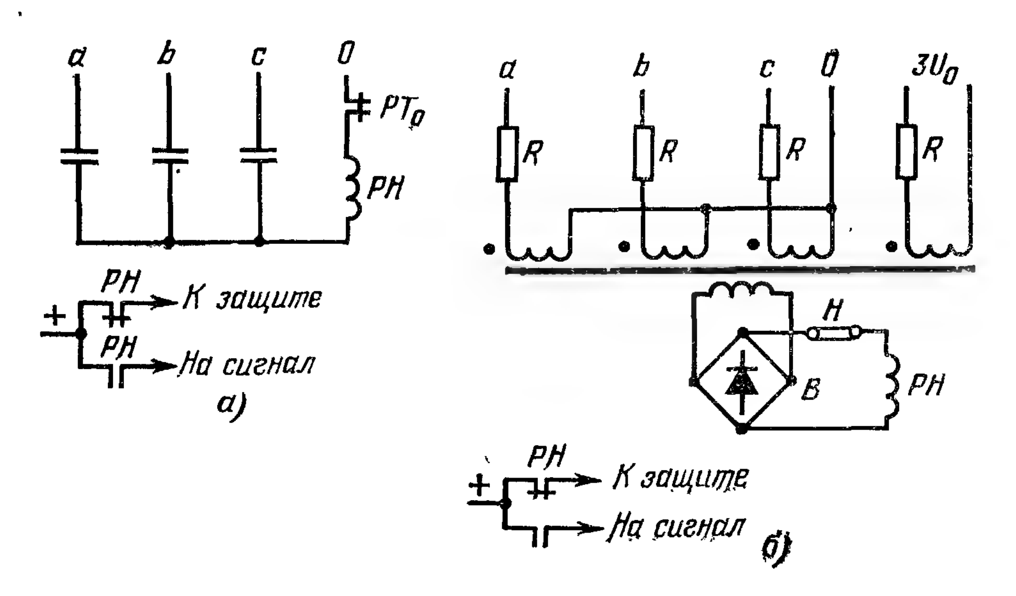


Рис. 18. Схемы устройств блокировки защиты при обрывах одной и двух фаз в цепях напряжения.

а — устройства типа КРБ-11; *б* — устройства типа КРБ-12.

щие через конденсаторы одинаковой емкости, симметричны и в блокирующем защиту электромагнитном реле *РН*, включенном в нулевой провод, нет тока; в комплекте типа КРБ-12 (рис. 18,*б*) токи в фазах, подающиеся через одинаковые добавочные резисторы в обмотки трансформатора напряжения блокировки с одинаковым числом витков, тоже симметричны и их сумма равна нулю, вследствие чего магнитный поток в магнитопроводе этого трансформатора отсутствует и через блокирующее защиту поляризованное реле *РН* ток не проходит.

При обрыве одной или двух фаз вторичной цепи напряжения равновесие фазных напряжений и токов нарушается, в результате чего срабатывает реле *РН* и своим размыкающим контактом снимает оперативный ток с защиты.

При обрыве всех трех фаз устройства блокировки типов КРБ-11, КРБ-12 не работают, что является их недостатком.

При замыканиях на землю на защищаемой линии равновесие фазных напряжений также нарушается, т. е. их векторная сумма перестает быть равной нулю (например, как это показано на рис. 3). Действие блокировки при этом недопустимо, так как может помешать защите ликвидировать к. з. Так, в сетях с заземленной нейтралью, для которых предназначена блокировка типа КРБ-11, ее срабатывание при двухфазном к. з. на землю на защищаемой линии привело бы к отказу защиты. В сетях с изолированной нейтралью, для которых используется устройство блокировки типа КРБ-12, срабатывание этого комплекта при замыкании на землю двух фаз в разных точках сети (двухфазное к. з. через землю, называемое двойным замыканием на землю) также вызвало бы отказ защиты на поврежденных линиях. Для предотвращения ненужного вывода из действия защиты при замыканиях на землю на защищаемой линии в устройстве типа КРБ-11 служит максимальное токовое реле PT_0, включенное в нулевой провод трансформаторов тока, от которых подается ток на защиту линии. При замыканиях на землю реле PT_0 срабатывает и разрывает своим размыкающим контактом цепь катушки реле *РН*. В комплекте блокировки типа КРБ-12 для той же цели на дополнительную обмотку трансформатора подается напряжение $3U_0$ от разомкнутого треугольника трансформатора напряжения. Проходящий по этой обмотке ток создает дополнительную м. д. с., восстанавливающую равновесие м. д. с. в магнитопроводе. Это достигается встречным действием суммы фазных м. д. с., пропорциональных фазным напряжениям, и м. д. с., создаваемой током в цепи напряжения $3U_0$, также равного сумме фазных напряжений (см. рис. 2 и 3). При этом для обеспечения равенства этих противодействующих м. д. с. заранее подбирается необходимое значение сопротивления регулируемого резистора в цепи дополнительной обмотки трансформатора блокировки, которое в сети с изолированной нейтралью должно быть в 3 раза меньше, чем при установке блокировки типа КРБ-12 в сети с заземленной нейтралью.

Обрыв вторичных цепей напряжения обычно происходит в результате их повреждения и сгорания предохра-

нителей или срабатывания защищающих трансформатор напряжения автоматов. При возникновении двухфазного к. з. во вторичных цепях трансформатора напряжения линейное напряжение между этими фазами будет равно нулю и защита сразу же начнет работать от тока нагрузки. Однако устройство блокировки типа КРБ-11 или КРБ-12 в это время действовать еще не будет, так как сумма фазных напряжений останется равной нулю, т. е. их равновесие не нарушается. Комплект блокировки в этом случае подействует только после сгорания предохранителей или срабатывания автоматов. Для предотвращения ложного действия быстродействующей защиты в рассматриваемом случае необходимо, чтобы суммарное время сгорания предохранителей (или срабаты-

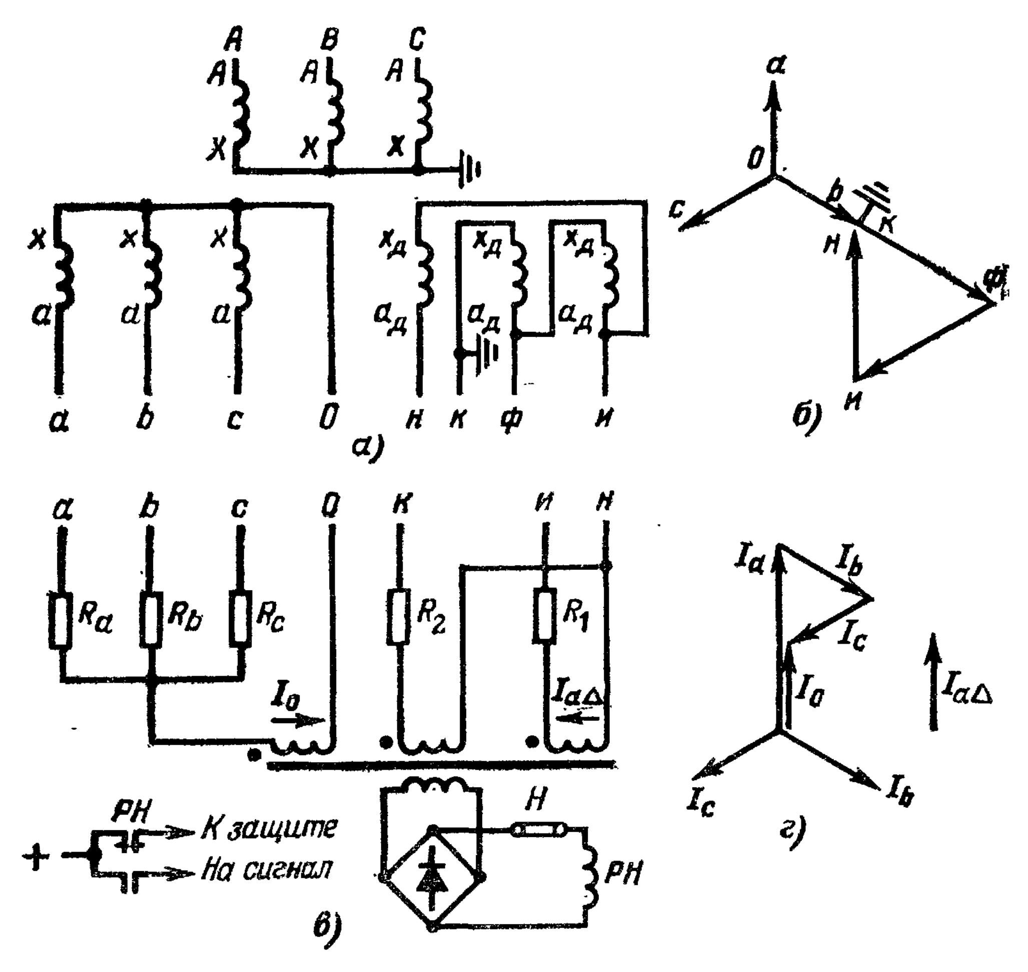


Рис. 19. Схема устройства блокировки защиты при обрывах одной, двух и трех фаз в цепях напряжения.

а — схема соединений обмоток трансформатора напряжения; *б* — векторная диаграмма на выводах трансформатора напряжения; *в* — схема устройства блокировки; *г* — векторная диаграмма токов при исправных цепях напряжения.

вания автоматов) и работы реле *РН* в схеме блокировки было меньше времени срабатывания этой быстродействующей защиты. При применении предохранителей это условие не соблюдается ввиду относительно большего времени их сгорания (во вторичных цепях трансформаторов напряжения 110—330 кВ может достигать 0,1—0,2 с при времени срабатывания быстродействующей защиты не более 0,1 с). Поэтому для обеспечения эффективного действия устройств КРБ-11 и КРБ-12 во вторичных цепях напряжения необходимо устанавливать быстродействующие автоматы с временем срабатывания не более 0,02 с.

Устройства КРБ-11, КРБ-12 принципиально несовершенны, так как для их действия требуется питание от поврежденных вторичных цепей трансформаторов напряжения после отключения защищающих его автоматов. Поэтому необходимо принимать специальные меры для повышения эффективности блокирования защиты, что приводит к существенному усложнению схемы включения трансформатора напряжения и его защиты, а это в свою очередь, понижает надежность работы блокируемых защит, получающих питание от этого трансформатора напряжения.

В целях принципиального улучшения блокирования защиты при нарушении исправности вторичных цепей трансформаторов напряжения 110—330 кВ взамен устройства КРБ-12 автором предложено новое устройство [1], схема которого показана на рис. 19.

Устройство включается во вторичные цепи трансформатора напряжения, схема которого и соответствующая ей векторная диаграмма условно показаны на рис. 19,*а* и *б*. Схема самого устройства приведена на рис. 19,*в*.

В этой схеме сопротивление резистора $R_a = 0{,}5R_b = 0{,}5R_c$. Соответственно ток I_0 в первичной обмотке трансформатора устройства блокировки при исправном состоянии цепей трансформатора напряжения равен $I_0 = 0{,}5I_a = I_b = I_c$ и совпадает по фазе с током I_a (см. векторную диаграмму на рис. 19,*г*).

---

[1] **Вавин В. Н.** Устройство для блокировки релейной защиты при обрывах во вторичных цепях трансформатора напряжения. А. С. № 440737 (СССР). Опубл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Пром. образцы. Товарные знаки», 1974, № 3, с. 1.

Вторая первичная обмотка трансформатора устройства блокировки включена через резистор R_1 на напряжение фазы a в схеме разомкнутого треугольника. Ток в этой обмотке $I_{a\Delta}$ совпадает по фазе с током I_0, но эти токи противоположно направлены в обмотках трансформатора и создают встречные м. д. с. Сопротивление резистора R_1 подобрано так, чтобы м. д. с. токов $I_{a\Delta}$ и I_0 уравновешивались. Вследствие этого реле PH в нормальном режиме не действует. При обрыве любой из фаз или нуля, или же всех трех фаз равновесие нарушается и реле PH срабатывает благодаря наличию питания со стороны обмоток, соединенных в разомкнутый треугольник.

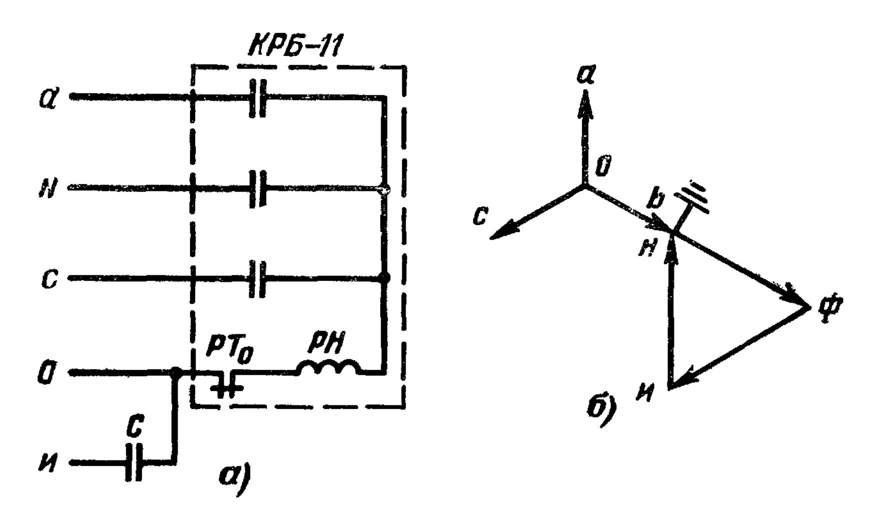


Рис. 20. Схема включения устройства КРБ-11 для блокировки защиты при обрывах незаземленных фаз, нулевого провода и всех трех фаз (a) и соответствующая схеме векторная диаграмма на выводах трансформатора напряжения (б).

При замыканиях на землю на защищаемой линии равновесие м. д. с. токов $I_{a\Delta}$ и I_0 нарушается так же, как в устройстве КРБ-12, и так же восстанавливается с помощью компенсационной обмотки, включенной через резистор R_2 в цепь $3U_0$.

Устройство, показанное на рис. 19, легко получить путем небольших переделок комплекта КРБ-12.

Для повышения надежности работы устройств блокировки типа КРБ-11 автором предложено, так же как и в устройстве КРБ-12, использовать обмотки трансформатора напряжения в цепи разомкнутого треугольника в качестве второго источника питания.

На рис. 20,*а* показана схема включения устройства КРБ-11 во вторичные цепи трансформатора напряжения, имеющего такую же схему соединений, как на рис. 19,*а*. На рис. 20,*б* повторена векторная диаграмма, соответствующая этой схеме.

В нормальном режиме на конденсаторы в устройстве КРБ-11 подаются три симметричных напряжения. При этом вместо напряжения фазы *b* подается такое же по абсолютному значению и по фазе напряжение $U_{н-о}$.

При нарушении исправности цепей напряжения (например, при исчезновении напряжений всех трех фаз от обмоток трансформатора напряжения, соединенных в звезду, вследствие отключения автомата) реле *РН* срабатывает, так как на него будет подано напряжение фазы *а* ($U_{н-и}$) из схемы разомкнутого треугольника через конденсатор в цепи *н* и дополнительный конденсатор *С* (2 мкФ).

Реле PT_0 в новой схеме используется так же, как и прежде.

Следует отметить, что при обрыве фазы *b* устройство КРБ-11 не подействует. Однако это можно считать допустимым, поскольку фаза *b* заземлена и в ней отсутствуют контакты реле-повторителей.

Блокировки типов КРБ-11 и КРБ-12 неприменимы для быстродействующих защит, предназначаемых для линий напряжением 500 кВ и выше. Эти защиты срабатывают с малым временем, не превышающим суммарного времени действия автомата и реле блокировки, вследствие чего комплекты типов КРБ-11, КРБ-12 не могут предотвращать ложного срабатывания защиты при повреждениях цепей напряжения. В связи с этим для защиты линий 500—750 кВ применяется устройство блокировки, выполняемое на другом принципе; его схема приведена на рис. 21. В этом устройстве осуществляется пофазное сравнение напряжений вторичных обмоток трансформатора напряжения *ТН*, соединенных в звезду, и обмоток, соединенных в разомкнутый треугольник. От каждой фазы тех и других обмоток *ТН* подается напряжение на соответствующую обмотку трансформатора устройства блокировки своей фазы через добавочный резистор.

Обмотки каждой фазы включены так, что проходящие в них токи этой фазы создают встречные м. д. с. в сердечнике и их сумма равна нулю. При повреждении

во вторичных цепях обмоток звезды или разомкнутого треугольника трансформатора *ТН* равновесие м. д. с. нарушается и под действием возникающего магнитного потока наводится э. д. с. во вторичной обмотке соответствующего трансформатора. Под действием этой э. д. с. появляется ток, проходящий через выпрямители в поляризованное реле *РН*; последнее срабатывает и снимает оперативный ток с защиты.

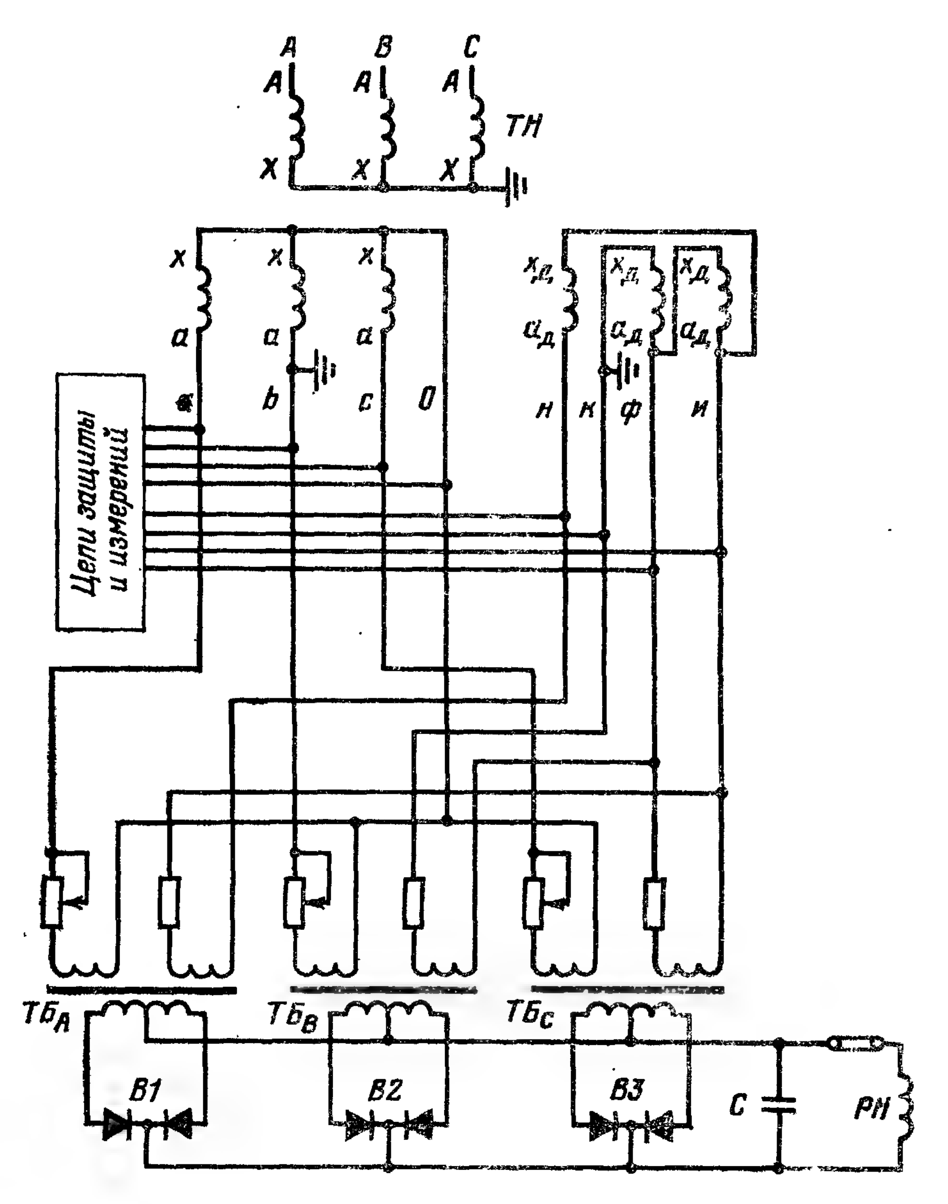


Рис. 21. Схема устройства блокировки защиты при неисправностях цепей напряжения, сравнивающего напряжения основных и дополнительных обмоток трансформатора напряжения.

$ТБ_А$, $ТБ_В$, $ТБ_С$ — трансформаторы блокировки; *В1*, *В2*, *В3* — выпрямители; *С* — сглаживающий конденсатор: *РН* — поляризованное реле.

Реле блокировки действует не только при обрывах, но и при к. з. во вторичных цепях, так как при этом сразу же нарушается равновесие м. д. с. в магнитопроводах трансформаторов. Это весьма существенное преимущество перед комплектами типов КРБ-11 и КРБ-12, обеспечивающее возможность предотвращения ложных действий защиты, работающей с очень малым временем.

При любых повреждениях на защищаемой линии, если вторичные цепи напряжения исправны, равновесие м. д. с. в трансформаторе каждой фазы сохраняется и блокировка не действует.

При времени срабатывания защиты около 0,1 с и выше указанные преимущества блокировки по схеме, показанной на рис. 21, несущественны, тем более, что при отключении трансформатора напряжения разъединителем она отказывает, так же как и блокировки, описанные выше (рис. 18—20). Во то же время она сложнее и дороже последних, поэтому эта блокировка не получила распространения в защите линий 35—220 кВ.

Заземление вторичных обмоток трансформаторов напряжения требуется Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) для повышения безопасности обслуживающего персонала при повреждениях трансформаторов напряжения и попадании высокого напряжения во вторичные цепи. Заземляться должна нулевая точка или один из концов вторичных обмоток.

При соединении основных вторичных обмоток в звезду чаще применяется заземление одной из фаз (обычно фазы *b*), а не нуля.

Вместо установки глухого заземления допускается заземлять нулевую точку вторичных обмоток через пробивной предохранитель. Такое выполнение заземления рекомендуется ПУЭ при использовании трансформатора напряжения для питания оперативных цепей переменного тока, с тем чтобы снизить вероятность ложных отключений выключателей в случаях повреждений изоляции этих цепей.

Заземление должно устанавливаться по возможности ближе к трансформатору напряжения. Однако следует учитывать, что при этом объединение заземленных проводов двух и более трансформаторов напряжения недопустимо, так как может послужить причиной неправильной работы релейной защиты. Последствия такого объединения показаны на рис. 22, где заземленные про-

вода фазы *b* от двух трансформаторов напряжения выведены на общую шинку *b*600.

Такая общая шинка может прокладываться на щите для трансформаторов напряжения одного РУ, а в тех случаях, когда вторичные цепи трансформаторов напря-

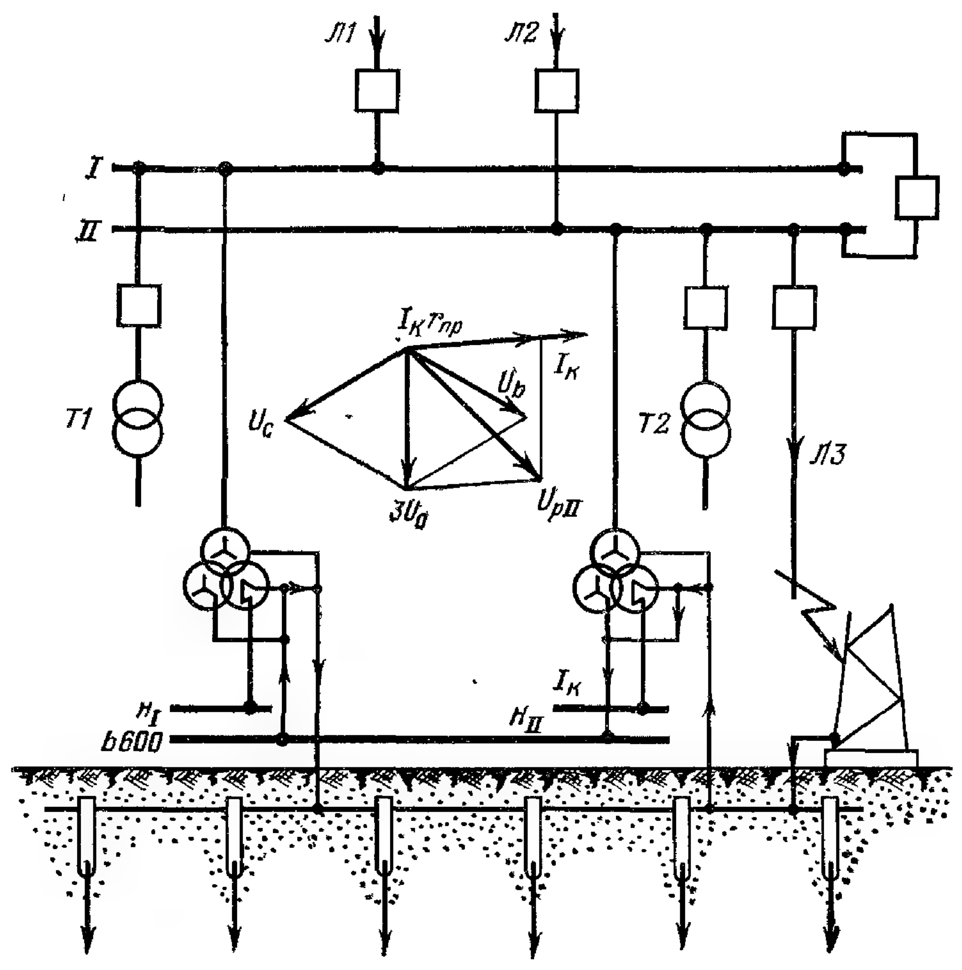


Рис. 22. Ответвление тока однофазного замыкания во вторичные цепи напряжения и векторная диаграмма вторичных напряжений.

жения двух и более РУ выведены на один общий щит, допускается применение общей заземленной шинки для трансформаторов напряжения всех этих РУ.

Общая шинка прокладывается в целях упрощения переключения реле и приборов отдельных присоединений с одного трансформатора напряжения на другой и включения устройства синхронизации. Возможность неправильного действия защиты при ее наличии возникает при к. з. на землю в пределах распределительного устройст-

ва вследствие того, что часть тока, проходящего через заземляющий контур подстанции, ответвляется во вторичные цепи (рис. 22), где создает значительные падения напряжения, искажающие векторную диаграмму напряжений, подающихся к панелям защиты. На векторной диаграмме (рис. 22) показаны вторичные напряжения фаз *b* и *c* и $3U_0$ трансформатора напряжения системы шин *II* при однофазном к. з. на фазе *A* линии *Л3*. При этом проходящий по вторичным цепям ток $I_к$ создает в жиле кабеля от трансформатора напряжения системы шин *II* до общей шинки *b*600 падение напряжения $I_к r_{пр}$.

Как показывают расчеты и результаты испытаний, падение напряжения в кабеле от трансформатора напряжения до щита в таких условиях может составлять 100 В и более. На реле направления мощности защиты от замыканий на землю линий *Л2* и *Л3*, подключенных к системе шин *II*, подается от шинок $н_{II}$ и *b*600 напряжение $U_{р\,II}$, равное векторной сумме напряжений $3U_0$ и $I_к r_{пр}$. Вектор напряжения $U_{р\,II}$ сдвинут по фазе относительно вектора $3U_0$ на значительный угол, вследствие чего защита линии *Л3* отказывает, а защита линии *Л2* неправильно срабатывает.

Во избежание подобных неправильных действий защиты заземление вторичных цепей трансформаторов напряжения, объединенных общей шинкой, устанавливается в одной точке — на этой общей шинке на щите.

Следует, однако, учитывать, что цепи напряжения, как правило, должны выполняться без общей заземленной шинки. При этом заземление вторичных цепей каждого трансформатора напряжения должно устанавливаться на ближайшей к нему сборке зажимов и объединение каких-либо проводов заземленных или незаземленных вторичных цепей разных трансформаторов напряжения не допускается даже кратковременно. С этой целью переключение нагрузки с одного трансформатора напряжения на другой производится только с разрывом цепи, а при включении устройств синхронизации сразу на два трансформатора напряжения обеспечивается электрическое разделение их вторичных цепей (например, с помощью разделительных трансформаторов).

Кроме установки заземлений для обеспечения безопасности обслуживания трансформаторов напряжения,

имеющих общие вторичные цепи, должна предусматриваться возможность отключения их вторичных обмоток от этих вторичных цепей.

Отключение трансформатора напряжения от вторичных цепей требуется правилами безопасности при ведении работ на трансформаторе и его ошиновке. Это необходимо во избежание появления высокого напряжения на первичной обмотке за счет обратной трансформации напряжения из вторичных цепей, подключенных в это время к другому работающему трансформатору напряжения или к постороннему источнику питания (например, для проверки измерительных приборов). В месте отключения должен создаваться видимый разрыв цепи, в связи с чем отключения автоматами, блок-контактами разъединителей или контактами промежуточных реле недостаточно.

Для отключения с видимым разрывом во вторичных цепях обычно устанавливаются рубильники или используются съемные трубчатые предохранители, разъемные соединения выкатных тележек в ячейках КРУ и т. п.

Во избежание понижения надежности заземления вторичных обмоток и цепей установка в заземленных проводах рубильников, автоматов, предохранителей и других аппаратов, отделяющих заземление от трансформатора напряжения, запрещается ПУЭ.

Прокладка вторичных цепей от трансформатора напряжения до щита должна выполняться контрольным или силовым кабелем без разделения одной цепи по разным кабелям. Например, выводящиеся от основных или дополнительных вторичных обмоток трансформатора напряжения трех- или четырехпроводные цепи должны подаваться на щит в одном кабеле. Двухпроводная цепь от концов одной обмотки однофазного трансформатора или от дополнительных обмоток, соединенных по схеме разомкнутого треугольника (цепь $3U_0$), также должна выводиться на щит в одном кабеле. Это необходимо во избежание значительного увеличения индуктивного сопротивления вторичных цепей и недопустимого возрастания потери напряжения в них. При полном объединении электрической цепи в одном кабеле создаваемые токами в близко расположенных друг к другу жилах этого кабеля магнитные потоки будут почти полностью взаимно уничтожаться, так как геометрическая (векторная) сумма токов одной цепи всегда равна нулю. Поэтому индук-

тивное сопротивление такой цепи будет относительно малым. При разделении той же цепи по разным кабелям равновесие токов и магнитных потоков нарушается и индуктивное сопротивление цепи резко возрастает.

Вторичные цепи трансформаторов напряжения, установленных на открытом РУ, должны выводиться на щит кабелями с металлической оболочкой или броней. При этом использование изолированной металлической оболочки (например кабеля ААШВ) в качестве одного из проводов вторичной цепи напряжения, по соображениям надежности, не допускается.

Для снижения продольных э. д. с., наводящихся в жилах этих кабелей токами к. з., проходящими по заземляющему контуру, металлическую оболочку или броню рекомендуется заземлять с обеих сторон.

Резервирование питания вторичных цепей трансформаторов напряжения предусматривается при двойной системе шин 35 кВ и выше и при подключении трансформатора напряжения к линии электропередачи. При двойной системе шин в качестве резервного используется трансформатор напряжения другой системы шин, а для трансформатора напряжения, подключенного к линии, трансформатор напряжения, присоединенный к шинам, к автотрансформатору или к другой линии.

Перевод нагрузки с одного трансформатора на другой может производиться с помощью ключей, переключателей или рубильников.

Предотвращение самопроизвольных смещений нейтрали необходимо в электроустановках 3—35 кВ при отсутствии компенсации емкостных токов, имеющих малые значения. В этих условиях вследствие несимметрии емкостей между отдельными фазами и землей, а также изменений сопротивления холостого хода трансформатора напряжения в зависимости от приложенного к нему напряжения возможна частичная компенсация указанных емкостей (не на всех трех фазах) индуктивностью трансформаторов напряжения. При разном характере сопротивлений между фазами и землей (рис. 23,*а*, *б*) происходит смещение нейтрали, которое может сопровождаться значительным возрастанием фазных напряжений (рис. 23,*в*). Это может вызвать одновременные повреждения изоляции в нескольких местах. Включением в цепь $3U_0$ относительно малого сопротивления около 25 Ом достигается значительное уменьшение напряже-

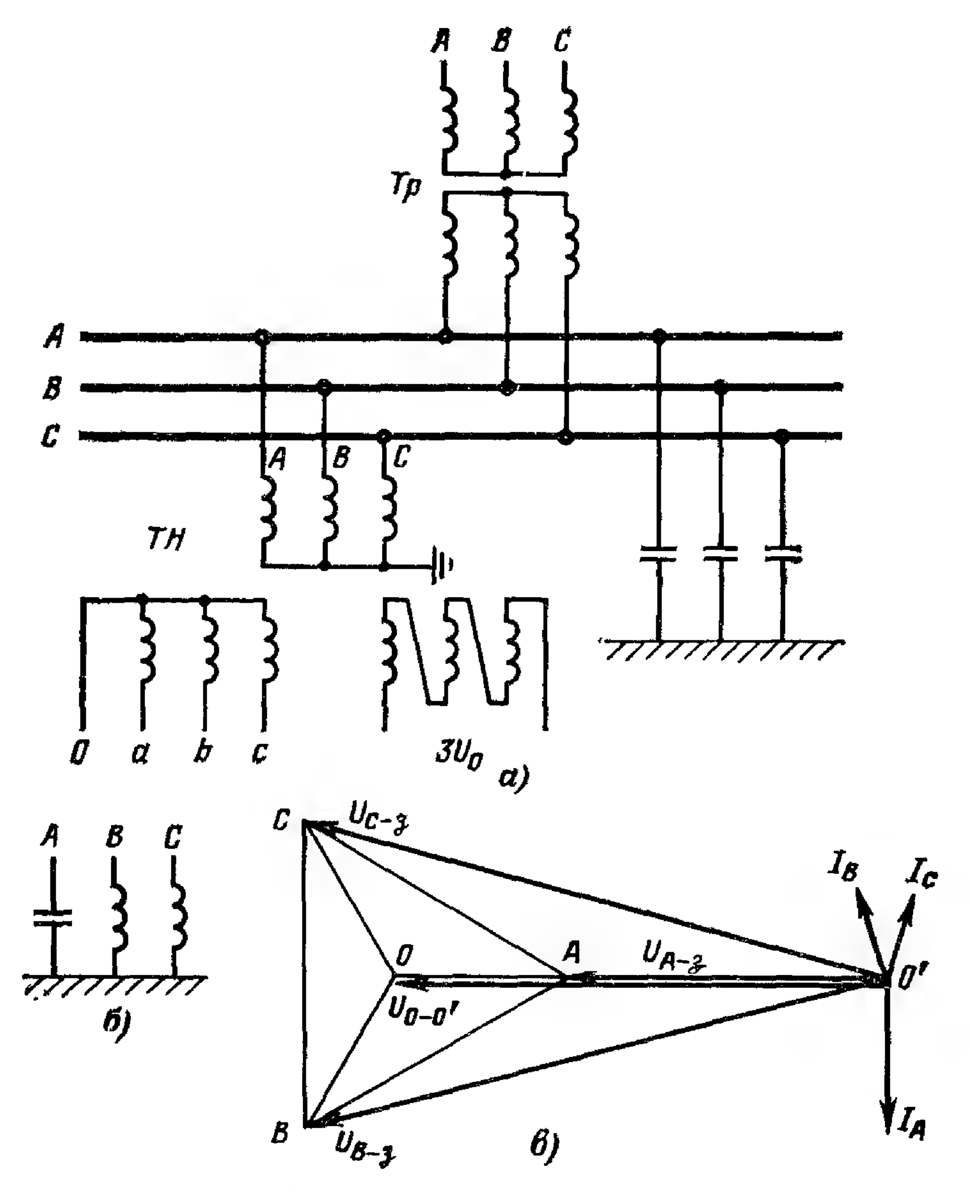


Рис. 23. Смещение нейтрали в некомпенсированной сети.

а — схема подстанции при включении трансформатора *Тр* на шины с подключенным трансформатором напряжения *ТН*; *б* — эквивалентная схема замещения при несимметрии емкостей по фазам; *в* — векторная диаграмма напряжений и токов; U_{0-0}' — вектор напряжения смещения нейтрали.

ния U_0, которому равно смещение нейтрали. При этом резко снижаются и фазные напряжения.

Следует иметь в виду, что в системе с малыми емкостными токами возможно также возникновение низкочастотных (субгармонических) колебаний в контуре, состоящем из емкости фазы на землю и индуктивности трансформатора напряжения. Такие субгармонические колебания не сопровождаются значительным повышением напряжения, но опасны для трансформатора напря-

жения, так как при этом в его первичных обмотках могут проходить большие токи. Для предотвращения субгармонических колебаний рекомендуется дальнейшее уменьшение активного сопротивления в цепи $3U_0$.

Схемы включения трансформаторов напряжения. В рассматриваемых ниже схемах не показаны разъединители трансформаторов напряжения, поскольку они являются элементами схемы первичных цепей.

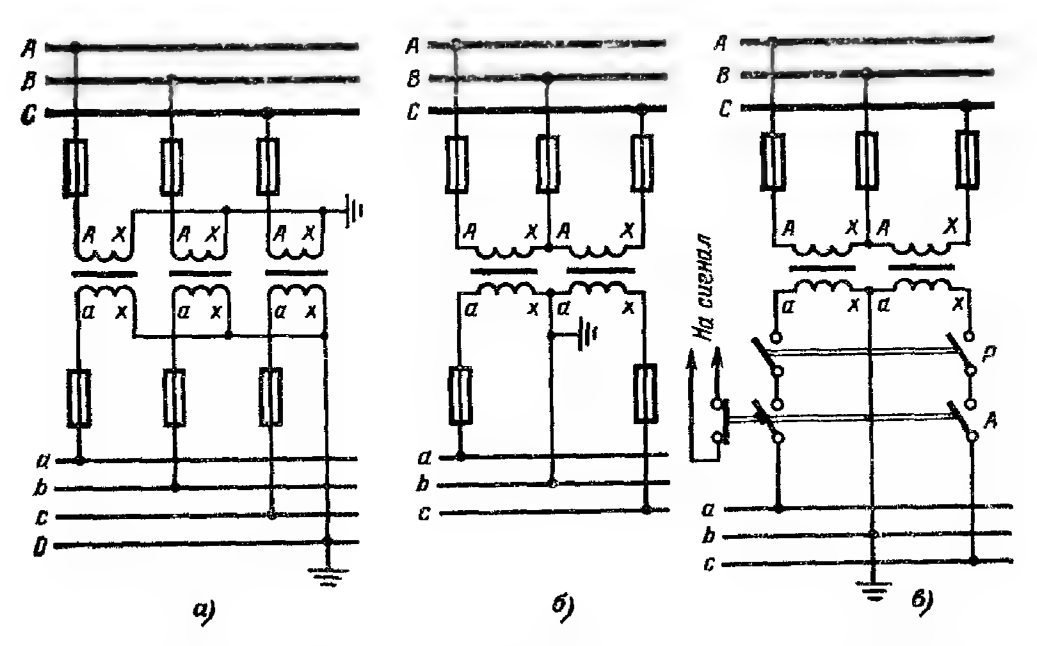


Рис. 24. Схема включения однофазных трансформаторов напряжения с одной вторичной обмоткой.

а — схема звезда—звезда для электроустановок 0,5—10 кВ с изолированной нейтралью; *б* — схема открытого треугольника для электроустановок 0,38—10 кВ; *в* — то же для электроустановок 6—10 кВ.

Простейшая схема с использованием одного однофазного трансформатора напряжения, показанная на рис. 1,*а*, применяется в пусковых шкафах двигателей и на переключательных пунктах 6—10 кВ для включения вольтметра и реле напряжения устройства АВР.

На рис. 24 приведены схемы включения однофазных трансформаторов напряжения с одной вторичной обмоткой для питания трехфазных вторичных цепей.

Группа из трех соединенных по схеме звезда — звезда однофазных трансформаторов, показанная на рис. 24,*а*, применяется для питания измерительных приборов, счетчиков и вольтметров контроля изоляции в электроустановках 0,5—10 кВ с изолированной нейтралью и не-

разветвленной сетью, где не требуется сигнализация возникновения однофазных замыканий на землю. Для обнаружения «земли» по этим вольтметрам они должны показывать значения первичных напряжений между фазами и землей (см. векторную диаграмму на рис. 3,*б*). Для этого нуль обмоток ВН заземляется и вольтметры включаются на вторичные фазные напряжения. Так как при однофазных замыканиях на землю трансформаторы напряжения могут длительно находиться под линейным напряжением, их номинальное напряжение должно соответствовать первичному междуфазному напряжению. Вследствие этого в нормальном режиме при работе под фазным напряжением мощность каждого трансформатора, а следовательно, и всей группы понижается в $\sqrt{3}$ раз, так как при номинальном токе

$$S_ф = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}} I_{ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3}},$$

$$S_{гр} = 3S_ф = \frac{3S_{ном}}{\sqrt{3}} = \sqrt{3}\,S_{ном} \quad \text{вместо} \quad 3S_{ном}.$$

Поскольку в схеме заземлен нуль вторичных обмоток, предохранители во вторичной цепи установлены во всех трех фазах.

На рис. 24,*б*, *в* трансформаторы напряжения, предназначенные для питания измерительных приборов, счетчиков и реле, включаемых на междуфазные напряжения, включены по схеме открытого треугольника. Эта схема обеспечивает симметричные междуфазные напряжения U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} при работе трансформаторов напряжения в любом классе точности. При применении схемы открытого треугольника мощность трансформаторов недоиспользуется, так как мощность такой группы из двух трансформаторов меньше мощности группы из трех соединенных в полный треугольник трансформаторов не в 1,5 раза, а в $\sqrt{3}$ раз. Это объясняется тем, что при полной нагрузке ток во вторичной цепи равен номинальному вторичному току трансформатора напряжения, и трехфазная мощность, выдаваемая группой открытого треугольника,

$$S = \sqrt{3}\,U_{ном} I_{ном} = \sqrt{3}\,S_{ном},$$

тогда как мощность группы полного треугольника

$$S = 3S_{ном}.$$

Из рассмотрения схем на рис. 24,*а*, *б* следует, что мощность группы из трех и двух трансформаторов одинакова, т. е. использование мощности трансформаторов в схеме на рис. 24,*б*, *в* все же более полное, чем в схеме на рис. 24,*а*.

Схема рис. 24,*б* применяется для питания цепей напряжения электроустановок 0,38—10 кВ при отсутствии защит, подверженных ложным действиям в случаях нарушения исправности этих цепей.

Во вторичных цепях схемы, показанной на рис. 24,*в*, вместо предохранителей установлен двухполюсный автомат *А*, при срабатывании которого блок-контакт замыкает цепь сигнала «обрыв напряжения». Заземление вторичных обмоток выполнено непосредственно у трансформатора напряжения на фазе *b*. Рубильник *Р* обеспечивает отключение вторичных цепей от трансформатора напряжения с видимым разрывом. Эта схема применяется в электроустановках 6—10 кВ при питании разветвленных вторичных цепей от двух и более трансформаторов напряжения.

Для питания неразветвленных трехпроводных вторичных цепей в электроустановках 0,38—10 кВ вместо двух включенных по схеме открытого треугольника трансформаторов напряжения (рис. 24,*б*) часто применяют трехфазные трансформаторы напряжения, включая их по схеме, приведенной на рис. 25,*а*.

В электроустановках 3—10 кВ, работающих с изолированной нейтралью, широко применяются трехфазные трансформаторы напряжения с двумя вторичными обмотками. На рис. 25,*б* показана схема включения такого трансформатора при питании четырехпроводных цепей напряжения от основных обмоток двух и более трансформаторов напряжения.

Основные обмотки трансформатора напряжения защищены трехполюсным автоматом *А*, включенным во все незаземленные провода вторичной цепи. Блок-контакты автомата используются для подачи сигнала «обрыв напряжения» и блокировки защиты минимального напряжения и устройства АВР размыканием цепи оперативного тока при отключении автомата.

К дополнительным обмоткам (цепь $3U_0$) обычно подключается только реле повышения напряжения, сигнализирующее о возникновении однофазных замыканий на землю. Поэтому в этой цепи нет рубильника и автомата

Рис. 25. Схема включения трехфазных трансформаторов напряжения.

а — трансформатор 0,38—10 кВ с одной вторичной обмоткой; *б* — трансформатор 3—10 кВ с двумя вторичными обмотками; *А* — автомат; *Р* — рубильник (или штепсельный контакт тележки шкафа КРУ); *R* — резистор.

Рис. 26. Схема включения однофазных трансформаторов напряжения 6—24 кВ с двумя вторичными обмотками, устанавливаемых на генераторах.

1ТН — трансформатор напряжения типа ЗНОМ; *2ТН* — трансформатор типа ЗОМ.

(последнее допускается ПУЭ для неразветвленных цепей напряжения).

При разветвленной цепи $3U_0$ (например, для питания устройств защиты от замыканий на землю типа ЗЗП) в незаземленном проводе этой цепи устанавливаются автомат и рубильник (или штепсельный контакт тележки шкафа КРУ).

На рис. 26 показана схема включения однофазных трансформаторов 6—20 кВ с двумя вторичными обмотками, устанавливаемых на мощных генераторах. Первичные обмотки подключаются без предохранителей к комплектным токопроводам, как показано на рис. 12. Каждая обмотка трансформаторов *1ТН*, *2ТН* заземлеиа отдельно. Основная вторичная обмотка трансформатора *1ТН* на напряжение $U_{ном}=100/\sqrt{3}$ В, питающая реле, приборы и устройства синхронизации, защищена автоматом *1А*. Цепь $3U_0$, питающаяся от дополнительных обмоток трансформатора *1ТН*, используется для защиты статора генератора от замыканий на землю. Она защищена автоматом *2А*.

Дополнительные обмотки трансформатора *2ТН* (на 100 В) обеспечивают питание АРВ напряжением 173 В. Они защищены автоматом *3А*.

В цепи $3U_0$ трансформаторов *1ТН*, *2ТН* включены резисторы *R1*, *R2*, предназначенные для предотвращения самопроизвольных смещений нейтрали.

Для повышения надежности питания реле повышения напряжения и измерительного органа АРВ рубильник в цепи основных обмоток *1ТН* установлен после автомата, а в цепи обмоток трансформатора *2ТН*, питающих АРВ, не установлен вообще. При этом видимый разрыв в цепи АРВ в случае необходимости может быть создан снятием крышки автомата *3А* и установкой изолирующей прокладки между его контактами.

На рис. 27,*а* приведена схема включения однофазных трехобмоточных трансформаторов напряжения 35 кВ типа ЗНОМ-35. Вторичные цепи основных и дополнительных обмоток выведены на шинки, находящиеся на щите.

На рис. 27,*б* показана потенциальная (топографическая) диаграмма вторичных напряжений, представляющая собой векторную диаграмму, на которой векторы напряжений основной и дополнительной обмоток совмещены соответственно схеме соединений и обозначены все узлы схемы, выведенные на шинки. На этой диаграм-

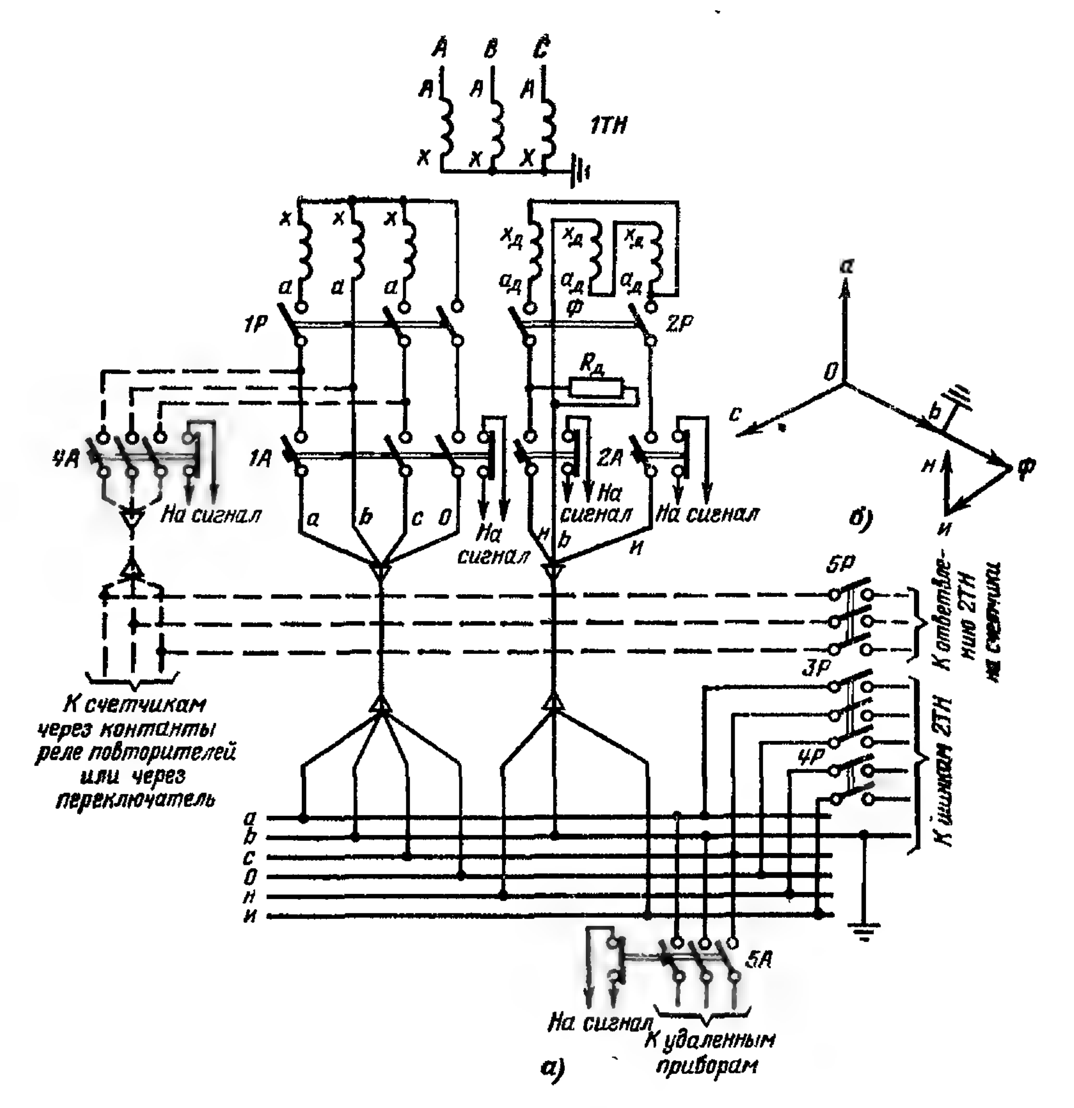


Рис. 27. Схема включения трансформатора напряжения 35 кВ при двойной системе шин.

1Р—5Р — **рубильники;** *1А—5А* — **автоматы.**

ме стрелки векторов соответствуют началам вторичных обмоток. Векторы напряжений U_a, U_b, U_c совпадают с векторами напряжений первичной цепи U_a, U_b, U_c.

Дополнительные обмотки соединены в разомкнутый треугольник по единой типовой схеме, рекомендуемой для всех трансформаторов напряжения 35 кВ и выше.

От одной из замкнутых вершин треугольника выведен провод на шинку *и*, используемую при проверках рабочим током защит от замыканий на землю, получающих питание от цепи $3U_0$.

Заземление вторичных обмоток трансформатора напряжения установлено на общей для распределительного устройства 35 кВ шинке фазы *b*.

Во всех незаземленных проводах, отходящих от трансформатора напряжения, установлены рубильники и автоматы. При этом для защиты цепи $3U_0$ в проводе *н* предусмотрен отдельный автомат.

В схеме предусмотрен неселективный автомат *5А* для присоединения удаленных нагрузок.

Отдельные цепи для питания расчетных счетчиков (показаны пунктиром) прокладываются в том случае, если при их питании по ранее проложенному общему кабелю потеря напряжения до расчетных счетчиков превысит 0,5%.

В схеме предусмотрено резервное питание вторичных цепей данного трансформатора напряжения от трансформатора напряжения *2ТН* через рубильники *3Р*, *4Р*, *5Р*. При включении этих рубильников необходимо отключить автоматы *1А—4А* и рубильники *1Р*, *2Р*.

Для предотвращения самопроизвольных смещений нейтрали в некомпенсированных сетях с малым емкостным током, в цепь $3U_0$ до автомата и рубильника включен резистор $R_д$.

На рис. 28 приведена схема включения трансформаторов напряжения 110—750 кВ *.

В этой схеме вторичные обмотки соединены так же, как в схеме на рис. 27. Однако в ней отсутствует автомат в цепи $3U_0$ и для защиты дополнительных обмоток используется двухполюсный автомат *2А* вместо однополюсного в связи с выводом на отдельную шинку второй замкнутой вершины треугольника (провод *ф*). Провод *ф* используется для целей синхронизации и для включения устройств блокировки защит 500—750 кВ при нарушении исправности цепей напряжения.

Заземления вторичных обмоток (отдельно для соединенных в звезду и в разомкнутый треугольник) установлены у трансформатора напряжения. В связи с этим переключение вторичных цепей данного трансформатора напряжения на питание от резервного производится с разрывом цепи (переключатели *1ПР*, *2ПР*).

Такие же переключатели с соответствующим числом полюсов можно применить и в схеме на рис. 27 вместо рубильников *3Р*, *4Р* и *5Р*. Это исключило бы необходимость в предварительном отключении автоматов и рубильников резервируемого трансформатора напряжения

* Схема трансформатора напряжения (каскадного или с емкостным делителем) со стороны ВН показана условно.

при переводе питания его вторичных цепей на другой трансформатор напряжения.

В этой схеме, как и на рис. 27, предусмотрен неселективный автомат для питания удаленных нагрузок.

К цепи $3U_0$ непосредственно за рубильником *2Р* подключен фиксирующий измерительный прибор *ФИП*, предназначенный для определения места к. з. на линии электропередачи. Этот прибор включается через отдельный кабель в связи с тем, что для него допускается потеря напряжения не более 2%, тогда как для защит, питающихся по общему кабелю, допустима потеря напряжения до 3%.

Цепи напряжения расчетных счетчиков на рис. 28 не показаны, так как для их питания более целесообразно устанавливать отдельные трансформаторы напряжения (на 110—220 кВ) или использовать резервные трансформаторы напряжения (на 330 кВ и выше).

Показанное на рис. 27 и 28 выполнение защиты соединенных в звезду основных обмоток трансформаторов напряжения 35—220 кВ с помощью одного трехполюсного автомата и применение единой унифицированной схемы включения для всех трансформаторов напряжения 110 кВ и выше стало возможным лишь после перехода на новые устройства блокировки защиты (показаны на рис. 19, 20), осуществляемого в 1971—1973 гг.

Ранее, когда для блокировки защит при нарушении исправности вторичных цепей трансформаторов напряжения 35—220 кВ применялись устройства КРБ-11, КРБ-12 (см. рис. 18), с целью повышения их эффективности основные обмотки трансформаторов напряжения на основе рекомендаций [2] защищались с помощью двух автоматов.

В связи с тем что на действующих электростанциях и подстанциях находится в работе большое количество трансформаторов напряжения с такой защитой, на рис. 29 в качестве примера приведена схема трансформатора напряжения 110—220 кВ указанного исполнения. В этой схеме для обеспечения возможности срабатывания устройства КРБ-12 (или КРБ-11) в случае отключения обоих автоматов (*1А* и *2А*), например при к. з. *b—0*, применялось шунтирование конденсатором полюса автомата *2А* в нулевом проводе. Однако при этом требовалась большая емкость конденсатора (до 70 мкФ), что приводило к созданию относительно больших токов

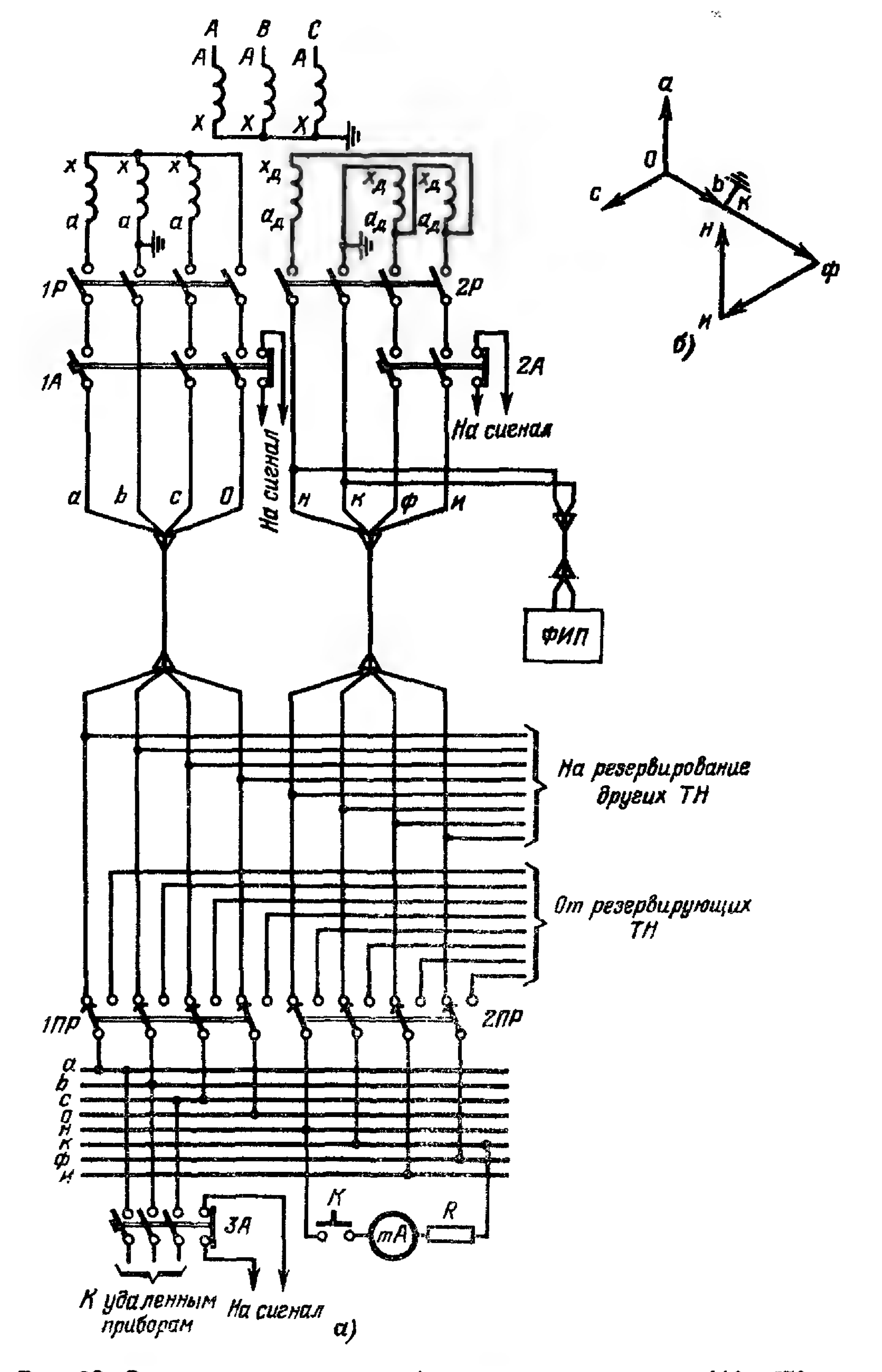


Рис. 28. Схема включения трансформатора напряжения 110—750 кВ.

а — схема; *б* — потенциальная диаграмма; *1Р—2Р* — рубильники; *1А—3А* — автоматы; *1ПР—2ПР* — переключатели; *ФИП* — фиксирующий измерительный прибор; *mA* — миллиамперметр; *R* — резистор; *K* — кнопка.

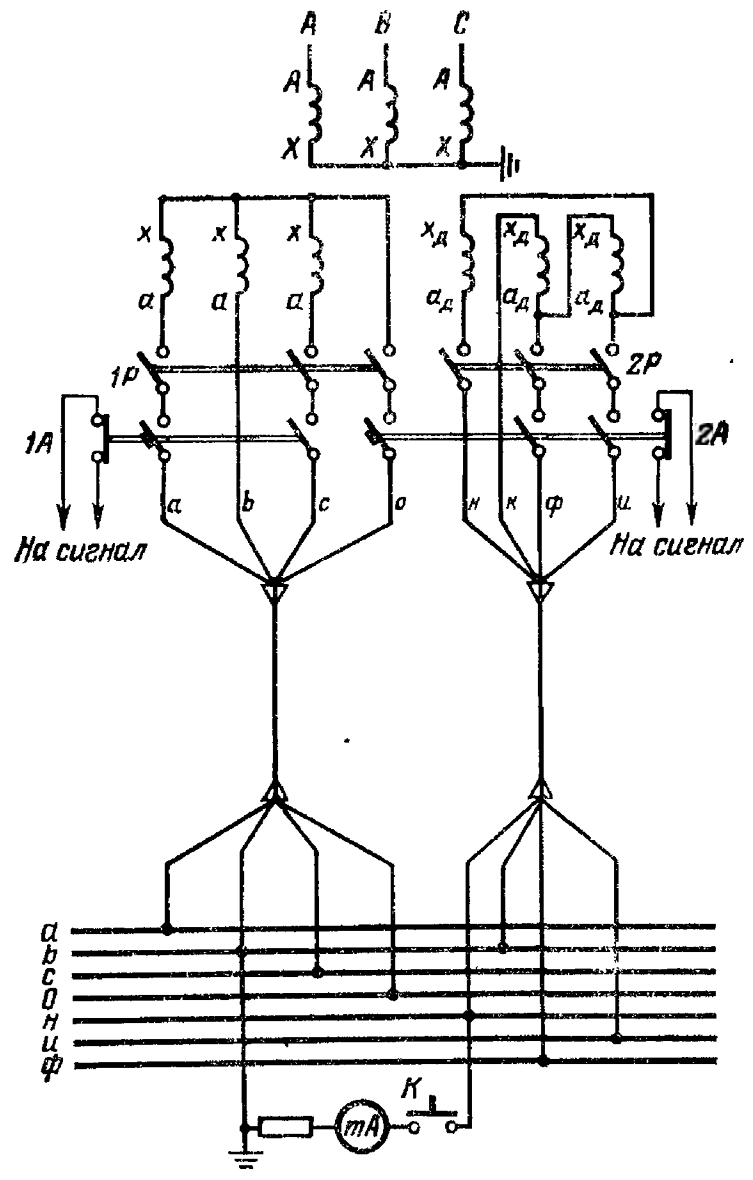


Рис. 29. Схема включения трансформатора напряжения 110—220 кВ, защищаемого двумя автоматами.

(до 1,3 А) в поврежденных и отключенных автоматами цепях напряжения.

Такие токи опасны для релейной и измерительной аппаратуры и могут вызвать значительное развитие повреждения. В связи с этим целесообразно отказаться от блокирования защиты с помощью устройств КРБ-11, КРБ-12 и от шунтирования автомата конденсатором.

Это должно учитываться при применении схемы, показанной на рис. 29. Эта схема неприменима при переходе на новые устройства блокировки, выполняемые со-

гласно рис. 19, 20, так как они не будут действовать в случае одновременного отключения обоих автоматов. Поэтому такие схемы трансформаторов напряжения могут быть сохранены лишь там, где отсутствует необходимость в переходе на новые устройства блокировки и старые устройства (КРБ-11 и КРБ-12) не блокируют защиту, а лишь сигнализируют о нарушении исправности ее цепей напряжения (например, при применении дистанционной защиты, все ступени которой вводятся в действие только при появлении тока обратной последовательности в линии, характеризующем возникновение к. з. в защищаемой сети). При этом шунтирующие автомат конденсаторы демонтируются, поскольку кроме устройств КРБ-11, КРБ-12 сигнал о неисправности цепей напряжения подается от блок-контактов автоматов.

7. ВЫПОЛНЕНИЕ ВТОРИЧНЫХ ЦЕПЕЙ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Способы переключения питания цепей напряжения. Переключение питания цепей напряжения релейной защиты, автоматики и измерительных приборов с одного трансформатора напряжения на другой осуществляется при наличии двойной системы шин, секционированных шин, при подключении трансформаторов напряжения к линиям высокого напряжения и т. д. При этом схемы соединения обмоток всех взаимозаменяемых трансформаторов напряжения должны быть одинаковыми.

Переключение может производиться вручную (рубильниками) или автоматически (блок-контактами разъединителей либо контактами реле-повторителей положения разъединителей). Реле-повторители в свою очередь управляются блок-контактами разъединителей.

Переключение обычно производится для всех цепей напряжения каждого присоединения, и лишь иногда переключающие рубильники устанавливаются для отдельных комплектов защиты на их панелях.

Ручное переключение применяется на подстанциях без обслуживающего персонала и при простых первичных схемах с небольшим количеством присоединений в распределительных устройствах (РУ).

На электростанциях и крупных узловых подстанциях с целью разгрузки оперативного персонала и снижения вероятности его ошибок применяют автоматическое пе-

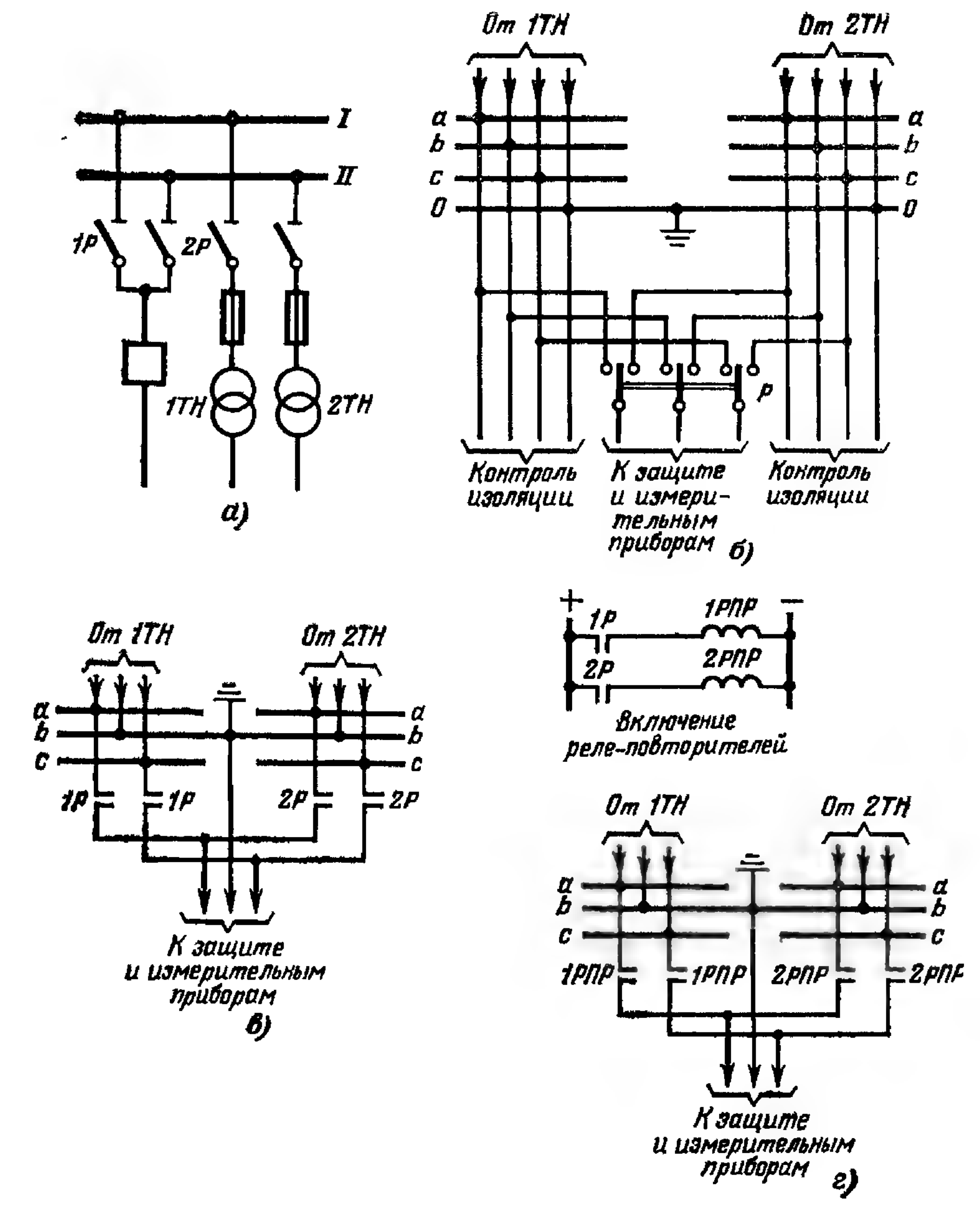


Рис. 30. Схемы вторичных цепей трансформаторов напряжения 6—35 кВ для подстанций с двойной системой шин.

реключение цепей напряжения. Однако автоматическое переключение вторичных цепей трансформаторов напряжения, подключаемых непосредственно к линиям, ввиду чрезмерной сложности его выполнения не получило распространения и вместо него обычно применяются переключающие рубильники или переключатели.

Примеры схем вторичных цепей напряжения. На рис. 30 приведены схемы вторичных цепей трансформаторов напряжения 6—35 кВ для подстанций с двойной

системой шин. Присоединение трансформаторов напряжения к шинам показано на рис. 30,*а*.

На рис. 30,*б* показаны вторичные цепи трансформаторов напряжения 6—10 кВ, включаемых по схеме на рис. 24,*а*. Переключение питания измерительных приборов и реле защиты каждого присоединения с трансформатора напряжения *1ТН* на трансформатор напряжения *2ТН* и обратно производится трехполюсным рубильником *Р*.

Следует отметить, что переключение могло бы производиться двухполюсными, а не трехполюсными рубильниками, если бы у трансформатора напряжения была заземлена фаза *b*, а не нуль.

Возможность такого сокращения количества переключающих контактов является одной из основных причин, по которой предпочтение отдается заземлению во вторичных цепях фазы *b*, а не нуля.

Вольтметры контроля изоляции для каждой системы шин подключаются к соответствующим трансформаторам напряжения непосредственно (помимо переключающих рубильников).

Схемы на рис. 30,*в*, *г* даны применительно к включению трансформаторов напряжения 6—35 кВ согласно схеме, показанной на рис. 24,*в*. В схеме на рис. 30,*в* вторичные цепи переключаются блок-контактами разъединителей *1Р* и *2Р* (показаны на рис. 30,*а*), а в схеме на рис. 30,*г* блок-контакты *1Р* и *2Р* управляют реле-повторителями *1РПР* и *2РПР*, а контакты этих реле производят переключение цепей напряжения.

Для обеспечения требуемой точности измерений и правильной работы релейной защиты имеет существенное значение монтажное выполнение вторичных цепей. Как указывалось выше, трехфазные цепи не должны распределяться по разным контрольным кабелям. Тем не менее неправильное выполнение вторичных цепей напряжения ранее получило широкое распространение и часто встречается на действующих электроустановках.

В качестве примера на рис. 31,*а* показано распространенное неправильное выполнение вторичных цепей, переключаемых блок-контактами разъединителей. После автомата *А*, установленного поблизости от трансформатора напряжения, фазы *а* и *с* заводятся на блок-контакты разъединителей всех присоединений (на схеме рис. 31,*а* показано только одно присоединение) и от

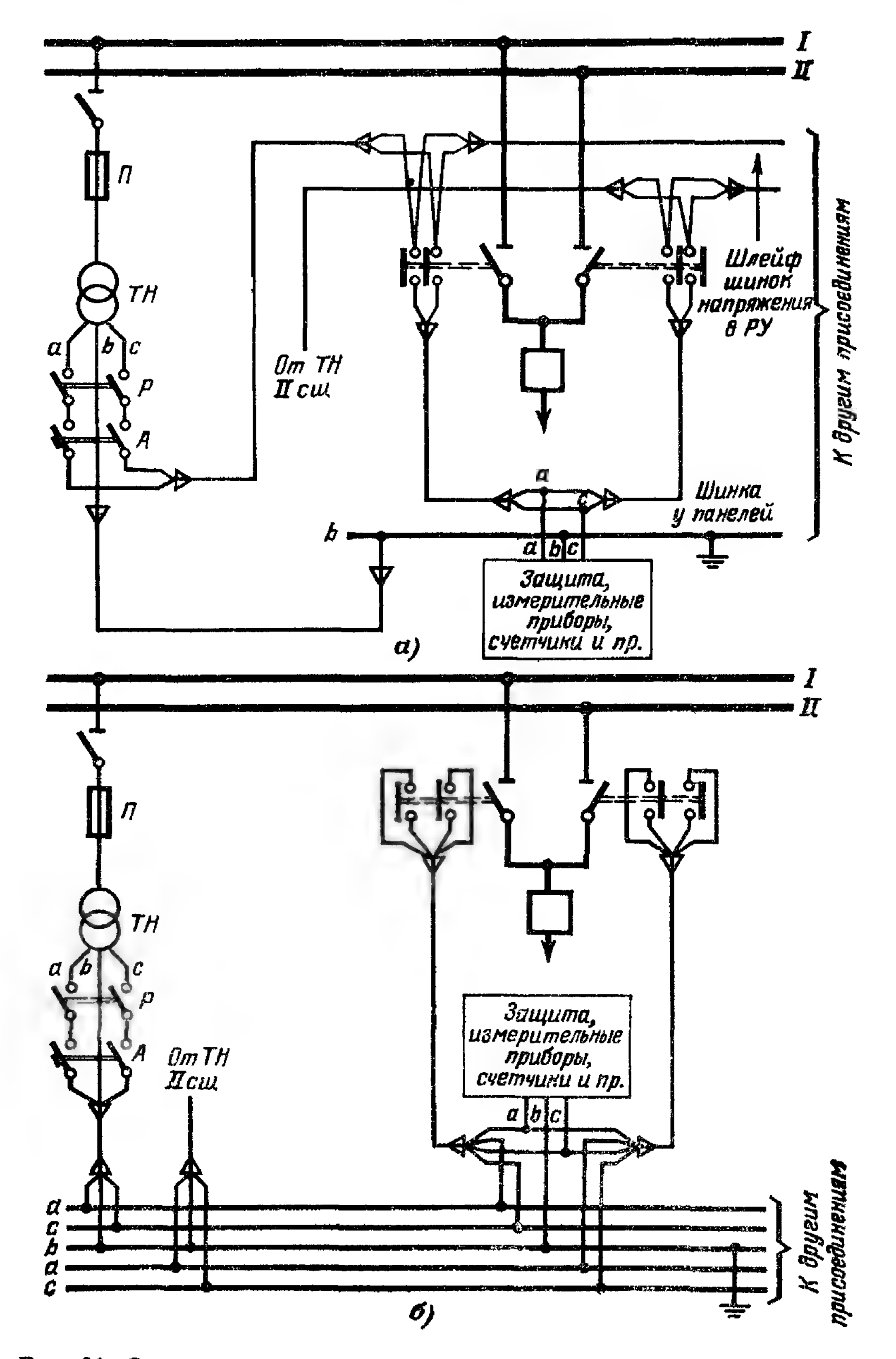


Рис. 31. Схема переключения вторичных цепей трансформаторов напряжения блок-контактами разъединителей.

разъединителей каждого присоединения подаются на сборку зажимов на панели этого присоединения. Заземленная фаза *b* подается на щит отдельным кабелем и там, в свою очередь, обходит (шинкой *b*) сборки зажимов на панелях всех присоединений, куда приходят фазы *a* и *c* из РУ.

При таком способе выполнения вторичных цепей напряжения потеря напряжения в этих цепях, как правило, превышает допускаемую ПУЭ. При этом вследствие больших падений напряжения в индуктивном сопротивлении такой разобщенной цепи довести потерю напряжения до приемлемых значений увеличением сечения жил кабелей (т. е. снижением активного сопротивления) обычно не удается.

Следует отметить, что такое неправильное выполнение вторичных цепей встречается не только в установках 6—10 кВ, как показано на рис. 31,*а*, но и в РУ 110—220 кВ. В этих случаях возможно неправильное действие релейной защиты вследствие наводок в кабелях вторичных цепей напряжения продольных э. д. с. током к. з., проходящим по заземляющему контуру подстанции. Так как жилы кабеля заземленной и незаземленной фаз от основных обмоток, а также от вывода *н* и второго заземленного конца цепи $3U_0$ идут на щит разными путями, то наведенные э. д. с. различны и их разность может оказаться достаточной для значительного искажения векторной диаграммы напряжений, подаваемых на защиту, что и приведет к ее неправильному действию. Такой случай известен из опыта эксплуатации одной из энергосистем СССР.

Способ правильного выполнения переключений блок-контактами разъединителей показан на рис. 31,*б*. Все три фазы напряжения приходят на щит, и затем со сборки зажимов каждого присоединения подаются на разъединители только переключаемые фазы *a* и *c*. Так как идущие к разъединителям двухпроводные цепи находятся в одном кабеле, сумма токов прямого и обратного направлений в жилах этого кабеля всегда равна нулю. Наведенные продольные э. д. с. во всех жилах этих кабелей одинаковы, и их разность равна нулю.

Для полного исключения наводок продольных э. д. с. во вторичных цепях напряжения отдельных присоединений их переключение блок-контактами разъединителей допускается только в РУ 6—35 кВ.

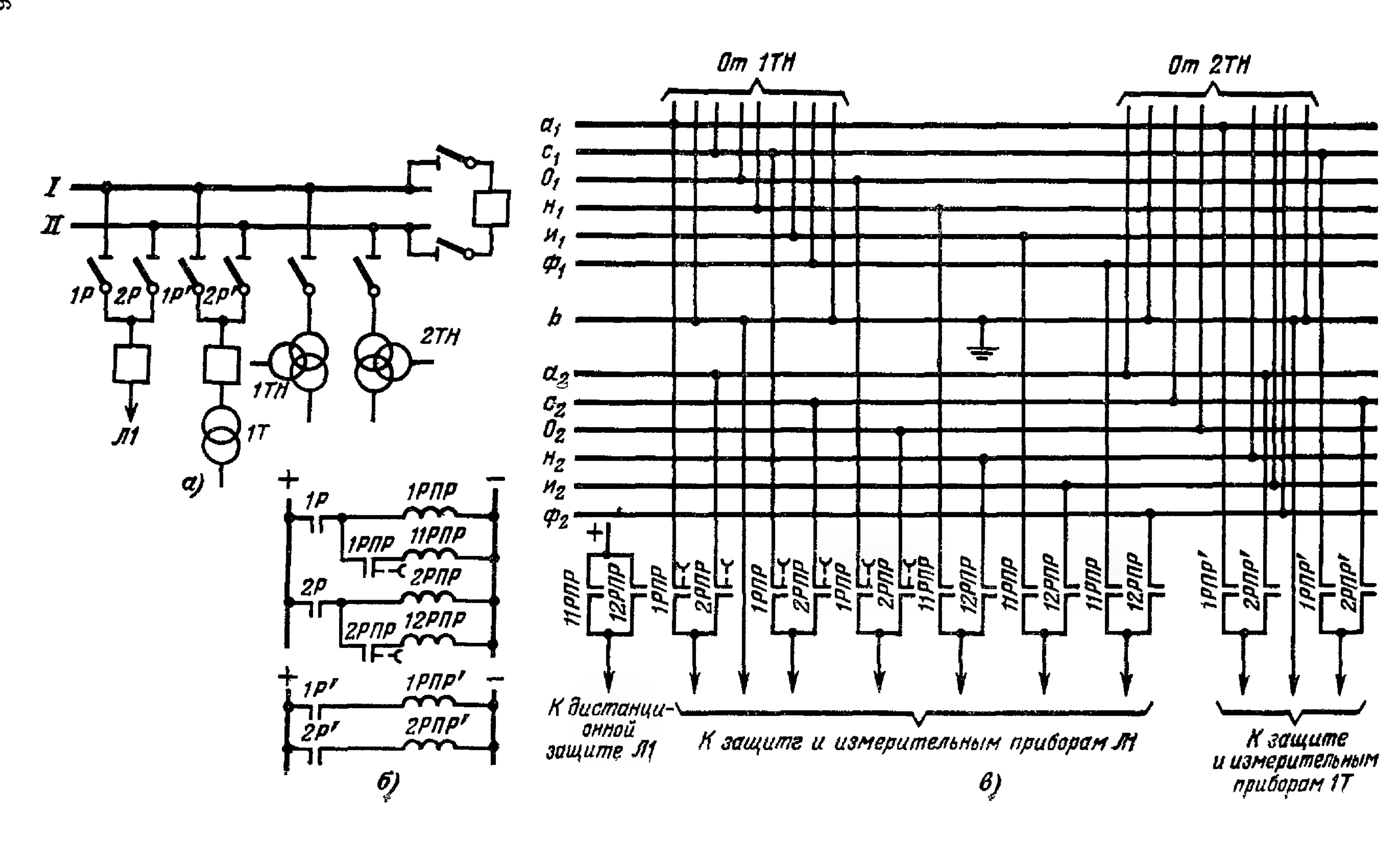
При переключении вторичных цепей трансформаторов напряжения 110—330 кВ с помощью реле-повторителей положения разъединителей возможно ложное срабатывание некоторых типов быстродействующей защиты линий (например, дистанционной, высокочастотной дифференциально-фазной) в случаях кратковременного исчезновения постоянного тока с панели защиты и с катушки реле-повторителя (например, при замене предохранителя). Срабатывание защиты при этом происходит от тока нагрузки, когда с нее снимается напряжение реле-повторителем, а отключение линии — в момент подачи постоянного тока до восстановления цепей напряжения (во время срабатывания реле-повторителя).

Для предотвращения таких ложных действий защиты либо принимают меры в ее схеме, либо используют реле-повторители и для подачи на нее оперативного тока. При этом реле-повторители включается так, что напряжение на защиту подается раньше, чем оперативный ток, а снимается сначала оперативный ток, а потом напряжение.

На рис. 32 приведена схема вторичных цепей трансформаторов напряжения *1ТН*, *2ТН*, установленных в РУ с двойной системой шин 110—330 кВ (рис. 32,*а*).

Выполнение вторичных цепей напряжения показано для двух вариантов установки заземления: на рис. 32,*б* и *в* — при установке заземления на общей шинке фазы *b* на щите (трансформатор напряжения включен по схеме, аналогичной приведенной на рис. 28 или 29), а на рис. 32,*г* и *д* — при установке заземления вблизи каждого трансформатора напряжения (при их включении по схеме рис. 28).

Для переключения напряжения, подаваемого на защиту и измерительные приборы линии, с одного трансформатора напряжения на другой в обоих вариантах предусмотрено по два реле-повторителя, управляемых каждым из разъединителей. Реле-повторители *1РПР* и *2РПР* имеют замедление на отпадание, а *11РПР* и *12РПР* не имеют. При отключении разъединителей реле *11РПР* и *12РПР* будут отпадать и снимать оперативный ток с защиты быстрее, чем замедленные реле *1РПР*, *2РПР* снимут с защиты напряжение. При включении разъединителей реле *11РПР*, *12РПР* будут срабатывать и подавать на защиту оперативный ток только после срабатывания реле *1РПР*, *2РПР*, подающих на защиту напряжение.


I
II
1Р
2Р
1Р'
2Р'
Л1
1Т
1ТН
2ТН
а)
1РПР
11РПР
2РПР
12РПР
1РПР'
2РПР'
б)
От 1ТН
От 2ТН
a_1
c_1
O_1
H_1
$И_1$
$Ф_1$
b
a_2
c_2
O_2
H_2
$И_2$
$Ф_2$
К дистанционной защите Л1
К защите и измерительным приборам Л1
К защите и измерительным приборам 1Т
в)

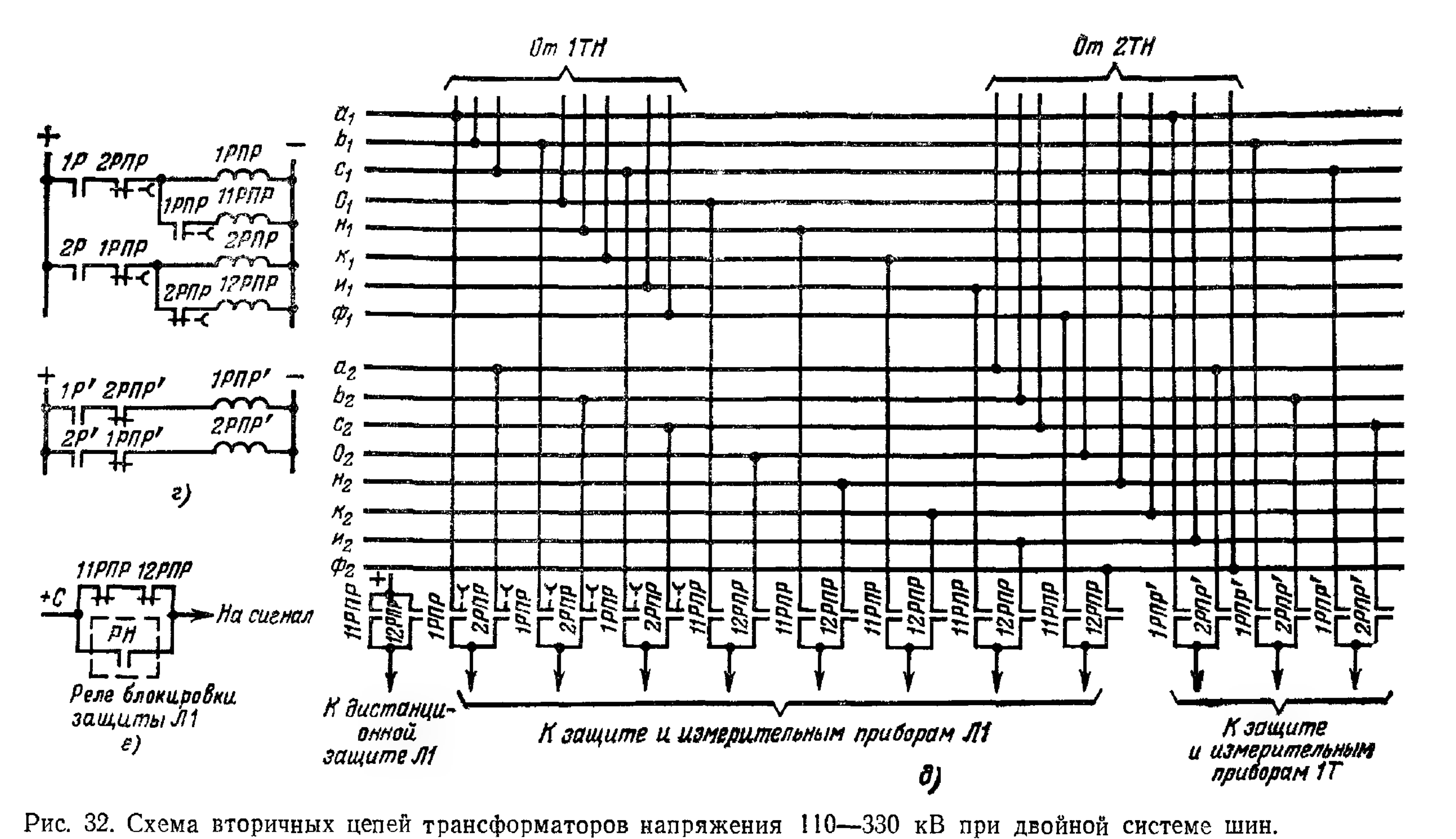


Рис. 32. Схема вторичных цепей трансформаторов напряжения 110—330 кВ при двойной системе шин.

а — схема РУ; *б* — схема включения реле-повторителей при наличии общей заземленной шинки в данном РУ; *в* — цепи напряжения при установке заземления на общей шинке; *г* — схема включения реле-повторителей при установке заземлений у каждого трансформатора напряжения; *д* — цепи напряжения при установке заземлений у каждого трансформатора напряжения; *е* — сигнализация неисправности цепей напряжения.

При таком включении реле-повторителей предотвращается также ложное срабатывание дистанционной защиты в случае, если блок-контакты разъединителей *1Р* и *2Р* из-за их разрегулировки окажутся разомкнутыми (например, после перевода линии на другую систему шин).

Для переключения напряжения, подаваемого на защиту и приборы трансформатора *1Т*, установлено два незамедленных реле-повторителя *1РПР*[1] и *2РПР*[1], управляемых разъединителями *1Р*[1] и *2Р*[1].

При одновременном обесточении реле-повторителей *11РПР* и *12РПР* подается сигнал с выдержкой времени «обрыв цепей напряжения» так же, как при срабатывании устройства блокировки защиты при неисправности цепей напряжения (рис. 32,*е*). Это необходимо на случай ненадежного замыкания блок-контакта разъединителя.

Во избежание недопустимого объединения вторичных цепей трансформаторов напряжения *1ТН*, *2ТН*, имеющих индивидуальные заземления, на рис. 32,*г* предусмотрена встречная блокировка реле-повторителей, выполненная на размыкающих контактах реле *1РПР*, *2РПР*. При этом переключающие контакты устанавливаются как в незаземленных, так и в заземленных проводах вторичных цепей (рис. 32,*д*).

В связи с этим при установке отдельных заземлений на каждом трансформаторе напряжения требуется большее количество контактов у реле повторителей, чем при общем заземлении. Это вызывает необходимость применения многоконтактных промежуточных реле или увеличения их количества.

Однако несмотря на то, что схемы на рис. 32,*б*, *в* несколько проще схем на рис. 32,*г*, *д*, последние принципиально более совершенны, так как полностью исключают возможность связи между собой вторичных обмоток двух и более трансформаторов напряжения, что может приводить к нежелательным последствиям.

Так, например, если при выводе в ремонт одной из систем шин во время переключения всех ее присоединений на другую систему шин на одном из них после отключения разъединителя его блок-контакт останется замкнутым (это возможно в случае обрыва механической тяги от привода разъединителя к его блок-контактам), то и основные вторичные обмотки трансформаторов напряжения обеих систем шин останутся соединенными

между собой через контакты реле-повторителей (рис. 32,*б*, *в*). Вследствие этого, после отключения шиносоединительного выключателя на систему шин, отключенную для ремонта, будет подаваться напряжение через последовательно соединенные трансформаторы напряжения *1ТН* и *2ТН*. При этом из-за большого емкостного тока шин возможно отключение автоматов обоих трансформаторов напряжения. В связи с изложенным, применение встречной блокировки реле-повторителей целесообразно и при установке заземления на щите на общей шинке фазы *b*.

Переключение вторичных цепей трансформаторов напряжения, присоединенных к линиям 330—500 кВ, на резервные трансформаторы напряжения, устанавливаемые на шинах (при полуторной схеме) или на автотрансформаторе (при схеме многоугольника) производится переключателями, как показано на схеме рис. 28. Для взаимного резервирования двух и более установленных на линиях 330—500 кВ трансформаторов напряжения ранее получила распространение схема, показанная на рис. 33, применявшаяся во вторичных цепях напряжения, имеющих одно общее заземление фазы *b* на щите. На рис. 33,*а* такое включение трансформаторов напряжения показано при выполнении РУ по схеме четырехугольника, а на рис. 33,*б* — по полуторной схеме. В обоих случаях цепи напряжения релейной защиты и измерительных приборов каждой линии могут переключаться с трансформатора напряжения своей линии на трансформаторы напряжения других линий. Это необходимо на случай выхода из строя своего трансформатора напряжения.

На рис. 33,*в* показана схема питания цепей напряжения защиты и измерительных приборов линии *Л1*. Нормально рубильники *Р1* и *Р2* включены в положение *1ТН* и реле и приборы линии *Л1* получают питание от своего трансформатора напряжения. При необходимости перевода цепей напряжения линии *Л1* на другой трансформатор напряжения рубильники *Р1* и *Р2* переключаются в положение *Другие ТН*, а рубильниками *Р3* и *Р4* подается питание от *2ТН* или *3ТН*.

Переключение осуществляется четырьмя трехполюсными рубильниками, а не двумя шестиполюсными для обеспечения надежности работы устройств блокировок, выполняемых по схеме, показанной на рис. 21, при пере-

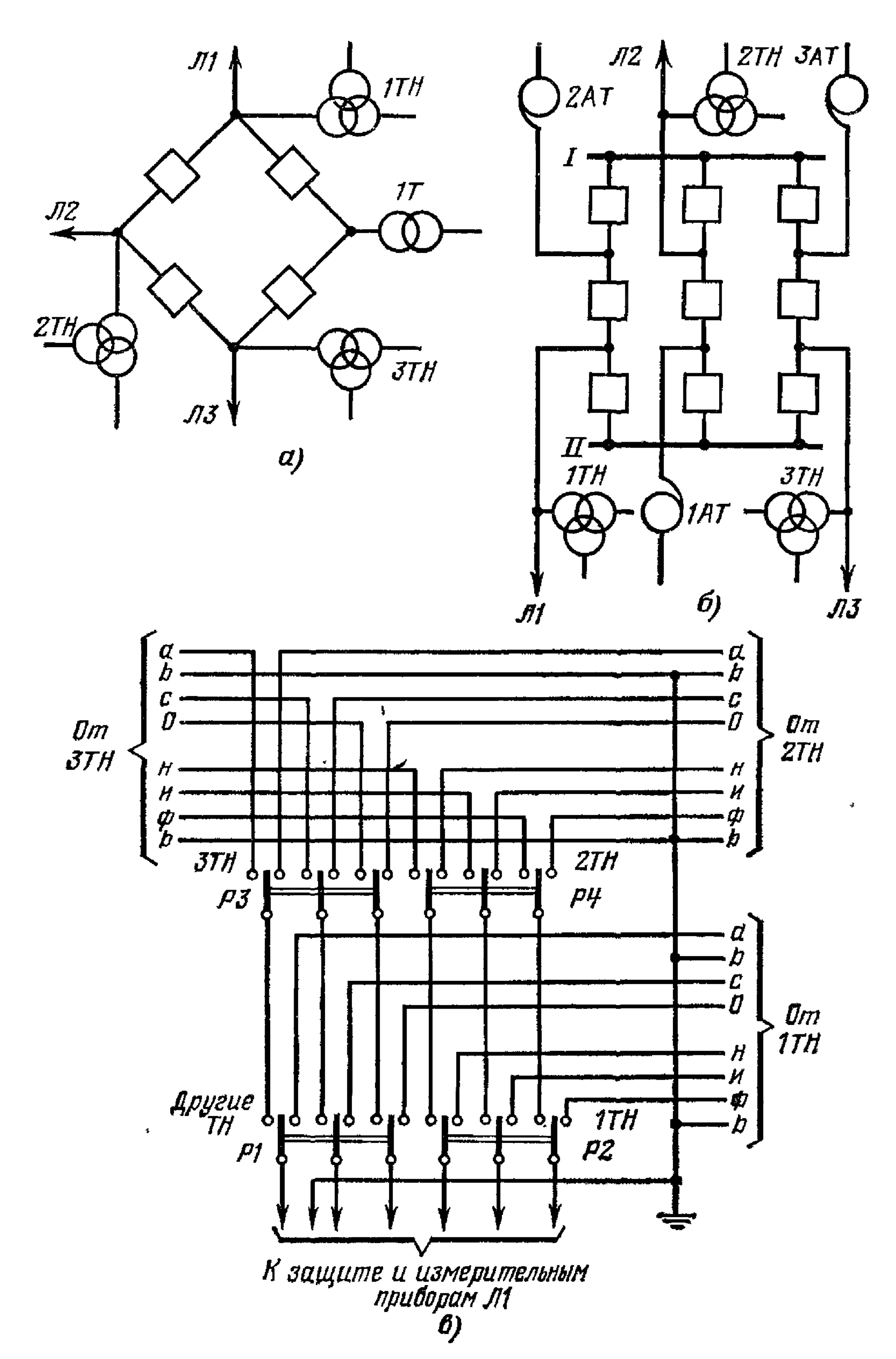


Рис. 33. Схема вторичных цепей трансформаторов напряжения 330—500 кВ, подключаемых к линиям электропередачи.

воде питания цепей напряжения защиты на другой трансформатор напряжения во время работы линии. В этом случае поочередное переключение рубильников *P1*, *P2* или *P3*, *P4* с кратковременным снятием напряжения с защиты не вызовет ее неправильного действия, так как будет срабатывать устройство блокировки, тогда как одновременное переключение цепей, питающихся от основных и дополнительных обмоток трансформатора напряжения (при применении шестиполюсных рубильников), привело бы к отказу блокировки и ложному отключению линии.

Контроль исправности цепей трансформаторов напряжения. При питании от трансформаторов напряжения устройств защиты и автоматики во избежание их неправильного действия из-за обрывов цепей напряжения кроме блокирования этих устройств на элементах напряжением 35 кВ и выше необходима сигнализация нарушения целости цепей напряжения.

Сигнализация обрыва цепей напряжения должна обеспечиваться при срабатывании автоматов или перегорании предохранителей во вторичной или первичной цепи трансформатора напряжения.

При отсутствии предохранителей достаточно сигнализации об отключении автоматов, предусматриваемой во всех схемах трансформаторов напряжения с автоматами во вторичных цепях.

Для контроля целости предохранителей в ряде случаев используются установленные в устройствах защиты и автоматики реле минимального напряжения (три реле, включенных на линейные напряжения), от которых подается сигнал «обрыв напряжения» с выдержкой времени, превышающей время действия защиты. Однако эти реле не всегда обеспечивают необходимую чувствительность.

На рис. 34,*а* показана схема трехфазного трансформатора напряжения с вторичной нагрузкой, включенной на линейные напряжения. При перегорании предохранителя на фазе *B* на вторичное напряжение *a* — *c* включены последовательно соединенные сопротивления z_{ab} и z_{bc}, напряжения U_{ab} и U_{bc} пропорциональны значениям этих сопротивлений. Если $z_{ab}=z_{bc}$, то $U_{ab}=U_{bc}=U_{ac}/2$ (см. векторную диаграмму). При неравенстве сопротивлений z_{ab} и z_{bc} одно из напряжений U_{ab} или U_{bc} будет меньше $U_{ac}/2$ и условия для срабатывания минимально-

го реле напряжения, включенного на это меньшее напряжение, будут лучше, чем при равенстве z_{ab} и z_{bc}. Для надежного действия реле ($k_н \geqslant 1,2$) при $U_{ab}=U_{bc}$ напряжение срабатывания минимальных реле напряжения должно быть не менее

$$U_{ср}=k_н U_р=1,2 \cdot 0,5 U_{ном}=0,6 U_{ном}.$$

При меньшей уставке контроль предохранителей не обеспечивается. В этом случае, а также при отсутствии реле минимального напряжения в защитах, имеющих цепи напряжения (например, токовые направленные за-

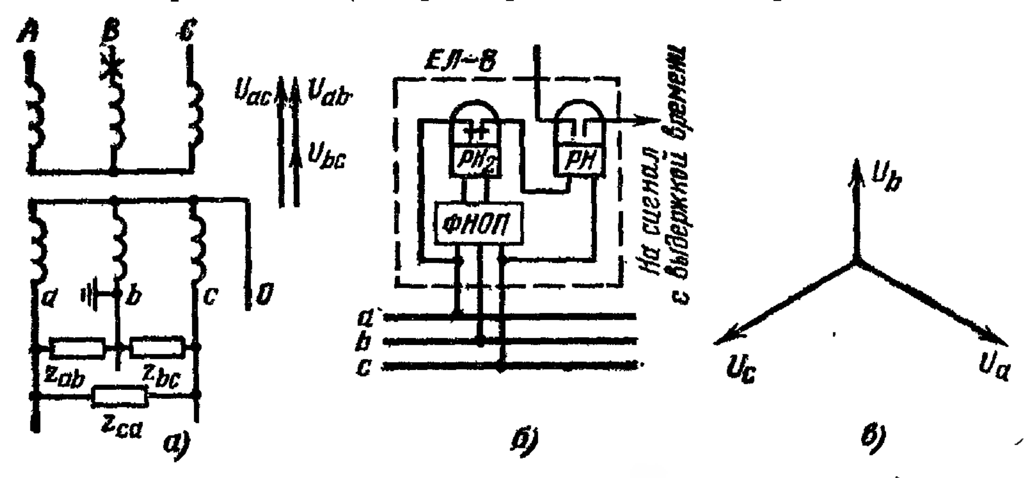


Рис. 34. Контроль предохранителей в цепях напряжения.

а — междуфазные напряжения во вторичной цепи при обрыве фазы *B*; *б* — схема включения реле контроля типа ЕЛ-8; *в* — векторная диаграмма вторичных напряжений трехфазного пятистержневого трансформатора при обрыве средней фазы (фаза *B*) со стороны ВН.

щиты, дистанционные защиты с токовым пуском и др.), для контроля предохранителей необходимо устанавливать специальные устройства. В качестве такого устройства может применяться предназначенное для контроля цепей напряжения комплектное реле типа ЕЛ-8 (рис. 34,*б*). В комплекте типа ЕЛ-8 имеется реле $РН_2$, включенное на три фазы через фильтр напряжения обратной последовательности *ФНОП* и реагирующее на нарушение симметрии линейных напряжений (например, при обрыве одной или двух фаз), и реле *РН*, включенное на линейное напряжение и предназначенное для сигнализации обрыва трех фаз, когда реле $РН_2$ не работает.

Реле *РН* подает сигнал и в тех случаях, когда на обрыв цепей реагирует только реле $РН_2$, так как последнее при срабатывании снимает напряжение с реле *РН*.

Устройство типа ЕЛ-8 должно действовать на сигнал с выдержкой времени во избежание подачи ложных сигналов при к. з., ликвидируемых защитой.

При питании цепей напряжения от трехфазного пятистержневого трансформатора напряжения (рис. 7,*б*) в случае перегорания предохранителя в одной из фаз со стороны ВН магнитные потоки двух других фаз, замыкаясь через крайние стержни и стержень оборванной фазы, восстанавливают в последней напряжение, значительно уменьшая несимметрию вторичных напряжений.

На рис. 34,*в* показана векторная диаграмма вторичных напряжений при обрыве средней фазы (фаза *B*) на стороне ВН. При этом напряжение оборванной фазы составляет $U_b = 0{,}5U_ф$, а линейные напряжения $U_{ab} = U_{bc} \approx 0{,}75U_{ном}$. Чувствительность контроля предохранителей, выполненного на устройстве типа ЕЛ-8, при этом оказывается недостаточной. Не подействуют и реле минимального напряжения, включаемые на линейные напряжения.

Требуемая чувствительность может быть достигнута при применении вместо устройства типа ЕЛ-8 реле напряжения обратной последовательности типа РНФ-1 с минимальной уставкой и реле минимального напряжения типа ЭН-50, включаемых по схеме, показанной на рис. 34,*б*.

У трансформаторов напряжения 110 кВ и выше кроме вторичных цепей основных обмоток контролируют исправность цепи разомкнутого треугольника дополнительных обмоток. Это необходимо ввиду ответственности этой цепи, питающей защиту линий от наиболее часто возникающих однофазных к. з. и невозможности выявления ее неисправности по постоянно работающим измерительным приборам.

Контроль исправности цепи $3U_0$ осуществляется путем периодических измерений напряжения небаланса, в нормальном режиме составляющего 1—3 В.

В связи с тем что в протяженных цепях $3U_0$ обычно наводится напряжение посторонними магнитными полями, соизмеримое с напряжением небаланса $U_{нб}$, измерение $U_{нб}$ вольтметром с большим внутренним сопротивлением может дать примерно одинаковые результаты при проверке исправной и оборванной цепей. В связи с этим для обеспечения правильных результатов проверки напряжение небаланса должно измеряться вольтмет-

ром с внутренним сопротивлением не более 200 Ом. Обычно вместо вольтметра применяют миллиамперметр типа Э-421 со шкалой до 100 мА и внутреннем сопротивлением 50 Ом. Его включают через резистор с $r=100$ Ом (рис. 28, 29).

Максимальному отклонению прибора соответствует напряжение $3U_0=15$ В. При измерении прибор подключается к цепи $3U_0$ кнопкой K.

Периодический контроль исправности цепи $3U_0$ отличается простотой выполнения и вполне достаточен, поскольку в этой цепи отсутствуют предохранители и автоматы.

8. РАСЧЕТНАЯ ПРОВЕРКА ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ И ИХ ВТОРИЧНЫХ ЦЕПЕЙ

Расчет нагрузки трансформаторов напряжения. Предварительный расчет для определения нагрузки и требуемой мощности трансформатора напряжения может быть выполнен по данным о потреблении отдельных реле и приборов, подключенных к цепям напряжения. Недостающие данные о потреблении отдельных реле, приборов или устройств могут быть получены путем измерения.

Потребление релейной и измерительной аппаратуры выражается в вольт-амперах (В·А). Для измерительных приборов оно обычно задается при $U_{ном}=100$ В, а для реле — часто и при других значениях напряжения. Для расчета потребление всей аппаратуры, включенной на линейное напряжение, должно быть приведено к напряжению 100 В, а аппаратуры, включенной на фазное напряжение — к напряжению $100/\sqrt{3}$. Пересчет с другого напряжения на расчетное производится по выражению

$$S_{расч}=\left(\frac{U_{расч}}{U}\right)^2 S_U, \qquad (5)$$

где $S_{расч}$ — потребление при расчетном (линейном или фазном) напряжении $U_{расч}$; S_U — потребление, заданное при напряжении U.

Это выражение составлено исходя из условия постоянства сопротивления реле (прибора) при напряжении U и $U_{расч}$.

Если известно только сопротивление z реле или прибора, то потребление определяется по выражению

$$S_{\text{расч}} = U^2_{\text{расч}}/z. \quad (6)$$

Для более полного использования мощности трансформаторов напряжения стараются по возможности выравнивать их вторичную нагрузку по фазам. Однако обычно имеется некоторая неравномерность нагрузки. Поэтому расчет нагрузки сводится к определению ее для наиболее загруженной фазы трансформатора напряжения.

Точный расчет вторичной нагрузки весьма затруднителен и сложен, в связи с чем в практических расчетах обычно допускают упрощения: суммирование потребляемой мощности производят арифметически, без учета разных коэффициентов мощности ($\cos\varphi$) отдельных нагрузок и неравномерность нагрузки учитывают приближенно. Эти упрощения создают некоторый расчетный запас.

В качестве расчетной для трехпроводных цепей напряжения может быть принята схема, приведенная на рис. 35,*а*.

Для расчета максимальной нагрузки трансформатора напряжения необходимо подсчитать суммарные нагрузки S_{ab}, S_{bc}, S_{ca}, приведенные к линейным напряжениям согласно (5).

Наиболее нагруженной фазой будет та, по которой проходит наибольший ток.

Токи I_{ab}, I_{bc}, I_{ca} создаются линейными напряжениями U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}, показанными на векторной диаграмме на рис. 35,*б*. Для более удобного рассмотрения диаграммы эти векторы на рис. 35,*в* перемещены так, что образуют симметричную звезду. Векторы $\dot{I}_{ab}$, $\dot{I}_{bc}$ и $\dot{I}_{ca}$ не равны между собой и отстают от соответствующих им напряжений на один и тот же угол φ.

Расположение векторов токов на диаграмме соответствует положительным направлениям этих токов, показанным на схеме рис. 35,*а*. Согласно этим положительным направлениям сумма токов $\dot{I}_a$ и $\dot{I}_{ca}$ равна току $\dot{I}_{ab}$ и, следовательно,

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}.$$

На рис. 35,*г* вектор I_a построен как сумма векторов $\dot{I}_{ab}$ и $-\dot{I}_{ca}$. Если бы токи I_{ab} и I_{ca} были равны, то их векторная разность была бы равна $\sqrt{3}I_{ca}$ (это очевид-

но из построения на диаграмме рис. 35,*г*). Прибавляя к вектору $\sqrt{3}\dot{I}_{ca}$ разницу в значениях токов I_{ab} и I_{ca} (рис. 35,*г*), получим вектор $\dot{I}'_a$. Значение тока I'_a легко подсчитать по формуле

$$I'_a = \sqrt{3}\,I_{ca} + (I_{ab} - I_{ca}). \qquad (7)$$

Если принять $I'_a = I_a$, то можно приближенно определить значение тока I_a. Аналогично могут быть определены токи I_b и I_c.

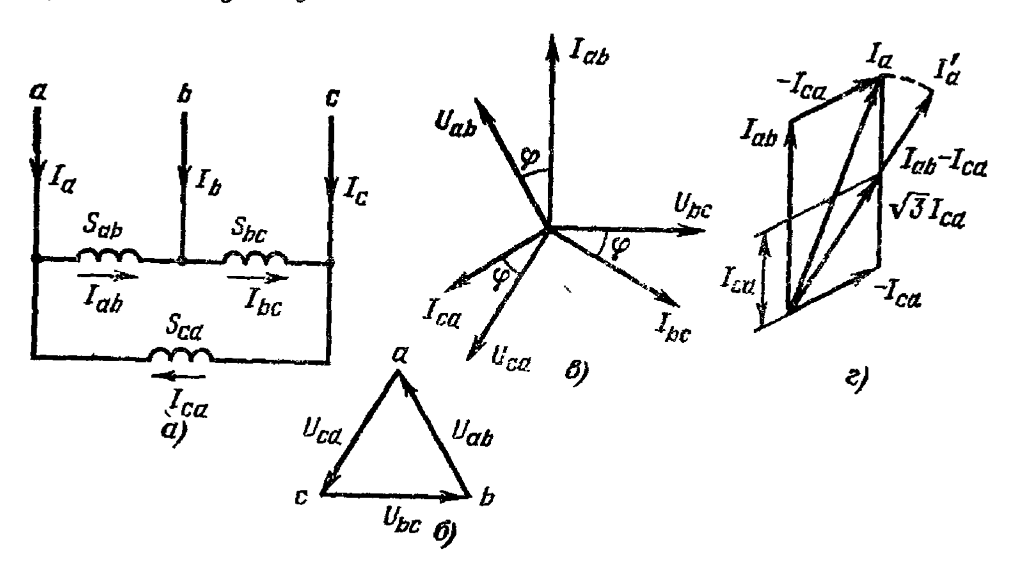


Рис. 35. Расчет вторичной нагрузки.

а — расчетная схема; *б* — диаграмма линейных напряжений; *в* — линейные напряжения и токи нагрузки; *г* — приближенное построение вектора тока нагрузки в фазе *а*.

Заменяя I'_a на $I_ф$ (ток в любой фазе), а I_{ab} на $I_{макс}$ (больший из двух токов междуфазных нагрузок, подключенных к этой фазе) и I_{ca} на $I_{мин}$ (меньший из этих двух токов), получим общее выражение для тока нагрузки любой фазы трансформатора напряжения:

$$I_ф = \sqrt{3}\,I_{мин} + (I_{макс} - I_{мин}),$$

или

$$I_ф = I_{макс} + 0{,}73 I_{мин}. \qquad (8)$$

При соединении трансформаторов напряжения в открытый треугольник требуется определить наибольшую нагрузку для одной из двух фаз. При включении трансформаторов по схеме на рис. 24,*б* (или 24,*в*) по ним проходят токи фаз *а* и *с*. Для этих двух фаз и нужно рассчитать нагрузку. Мощность нагрузки каждого из

трансформаторов напряжения

$$S_{ТН}=U_{мф}I_ф.$$

После подстановки значения $I_ф$ из (8) получим:

$$S_{ТН}=S_{макс.мф}+0,73S_{мин.мф}, \quad (9)$$

где $S_{макс.мф}$ и $S_{мин.мф}$ — мощности большей и меньшей из двух междуфазных нагрузок, подключенных к данной фазе (a или c на рис. 35,*а*).

При равномерной нагрузке (одинаковый ток во всех трех фазах) $S_{макс.мф}=S_{мин.мф}$ и $S_{ТН}=1,73S_{мф}$. Если ту же нагрузку ($\Sigma S_{ТН}=3S_{мф}$) распределить между фазами так, чтобы $S_{ab}=S_{bc}$ и $S_{ca}=0$, то на каждый трансформатор напряжения придется половина нагрузки $\Sigma S_{ТН}$, т. е. $S_{ТН}=1,5S_{мф}$, а не $1,73S_{мф}$. Следовательно, при схеме открытого треугольника выгоднее не включать нагрузку на напряжение U_{ca}, а по возможности равномерно распределить ее между напряжениями U_{ab} и U_{bc}.

При соединении трех однофазных трансформаторов напряжения в звезду мощность нагрузки каждого из трансформаторов напряжения составляет:

$$S_{ТН}=\frac{U_{мф}}{\sqrt{3}}I_ф.$$

Подставляя значение тока $I_ф$ из (8), получаем мощность, потребляемую от трансформатора напряжения любой из фаз междуфазной нагрузкой вторичных цепей (рис. 35,*а*):

$$S'_{ТН}=\frac{S_{макс}}{\sqrt{3}}+\frac{0,73S_{мин}}{\sqrt{3}},$$

или

$$S'_{ТН}=0,58S_{макс}+0,42S_{мин}. \quad (10)$$

При равномерной нагрузке $S'_{ТН}=S_{мф}$, что в $\sqrt{3}$ раз меньше, чем при схеме открытого треугольника.

При наличии нагрузок, включенных на фазные напряжения (в четырехпроводных вторичных цепях), потребляемая ими мощность $S''_{ТН}=S_ф$, приведеная к фазному напряжению согласно (5), должна суммироваться с мощностью междуфазной нагрузки $S'_{ТН}$ соответствующих фаз; при этом полная мощность нагрузки любой из фаз трансформатора напряжения будет:

$$S_{ТН}=S'_{ТН}+S''_{ТН},$$

или

$$S_{\text{TH}}=0{,}58S_{\text{макс}}+0{,}42S_{\text{мин}}+S_{\text{ф}}. \qquad (11)$$

Мощность нагрузки наиболее загруженной фазы, подсчитанная по соответствующему из приведенных выражений (9)—(11), сопоставляется с мощностью выбираемого однофазного трансформатора напряжения в требуемом классе точности (см. табл. 1). Если три однофазных двухобмоточных трансформатора напряжения включены по схеме, показанной на рис. 24,*а*, то их мощность недоиспользуется и ее следует принимать равной $S_{\text{ном}}/\sqrt{3}$.

При питании вторичной нагрузки от трехфазного трансформатора напряжения с его мощностью в нужном классе точности сопоставляется утроенная мощность нагрузки наиболее загруженной фазы.

Выбор сечения жил кабелей во вторичных цепях напряжения. Сечение проводов во вторичных цепях определяется по допустимой потере напряжения, установленной ПУЭ. В целях упрощения расчетов потеря напряжения принимается равной падению напряжения. Тогда потеря линейного напряжения будет $\Delta U=\sqrt{3}\,Ir_{\text{пр}}$.

Так как номинальное линейное напряжение во вторичных цепях $U_{\text{ном}}=100$ В, допустимая потеря напряжения в вольтах равна допустимой потере напряжения в процентах.

Допустимые потери напряжения (см. п. 2) составят от трансформатора напряжения до расчетного счетчика межсистемной линии электропередачи (при классе точности трансформатора напряжения 0,5) 0,25 В, до других расчетных счетчиков 0,5 В, до измерительных приборов 1,5 В, до реле защиты и автоматики 3 В.

Так как цепи напряжения для защиты и измерительных приборов выполняются общими, практически контрольные кабели для этих цепей выбираются по условию обеспечения $\Delta U\%\leqslant 1{,}5\%$, т. е. $\sqrt{3}Ir_{\text{пр}}\leqslant 1{,}5$ В. При этом в ряде сучаев приходится прокладывать вместо контрольных силовые кабели, так как при большой мощности вторичной нагрузки и значительной протяженности кабелей (например, в установках 110 кВ и выше) требуется большое сечение их жил.

Если от этих цепей питаются расчетные счетчики, то потеря линейного напряжения не должна превышать $\sqrt{3}Ir_{\text{пр}}=0{,}5$ В. При значительном удалении щита от

трансформаторов напряжения во избежание чрезмерного завышения сечения жил кабелей целесообразно от шкафа трансформатора напряжения до счетчиков прокладывать отдельный кабель.

Для определения требуемого сечения жил кабеля по заданной величине $\Delta U_{доп}$ вычисляется наибольшее допустимое сопротивление одной жилы кабеля в фазовом проводе

$$r_{пр.макс}=\Delta U_{доп}/\sqrt{3}\,I_{нагр} \quad (12)$$

или в цепи $3U_0$, где

$$r_{пр.макс}=\Delta U_{доп}/2I_{нагр}. \quad (13)$$

Для этого необходимо предварительно определить ток нагрузки, который составляет:

для вторичных цепей, питающихся от обмоток трансформаторов напряжения, соединенных в открытый треугольник или в звезду,

$$I_{нагр}=\sqrt{3}\,S_{ТН}/U_{ном}, \quad (14)$$

где $S_{ТН}$ — подсчитанная по (9), (10) или (11) нагрузка, В·А; $U_{ном}$ — линейное номинальное напряжение, равное 100 В.

Для вторичной цепи разомкнутого треугольника (цепь $3U_0$)

$$I_{нагр}=S_{ТН}/100, \quad (15)$$

где $S_{ТН}$ — суммарное потребление нагрузки цепи, приведенное к напряжению 100 В.

Выражение (15) соответствует режиму однофазного замыкания на землю.

Выбор сечения жил кабелей часто выполняют по мощности трансформатора напряжения, считая, что со временем его вторичная нагрузка может возрасти до максимально допустимой для соответствующего класса точности. При этом ток $I_{нагр}$ принимают равным номинальному току соответствующей обмотки трансформатора напряжения.

Следует учитывать, что сопротивление жилы кабеля, подсчитанное по (12), (13), может потребоваться уточнить по результатам проверки чувствительности автоматов.

Сечение жил кабеля в квадратных миллиметрах определяется по формуле

$$q = \frac{l}{\gamma r_{\text{пр.макс}}}, \qquad (16)$$

где l — длина кабеля; γ — удельное сопротивление (равно 57 для меди и 34,5 для алюминия); $r_{\text{пр.макс}}$ — сопротивление жилы кабеля, подсчитанное по (12) или (13).

При определении длины кабеля от трансформатора напряжения до щита необходимо учитывать, что в нее входит двойная длина кабелей от трансформаторов напряжения каждой фазы до ближайшей к ним сборки выводов. Эти кабели должны иметь такое же сечение, как кабель от указанной сборки до щита. При этом принимается ближайшее большее полученного по (16) стандартное сечение. Тогда потеря напряжения ΔU будет меньше $\Delta U_{\text{доп}}$.

Потеря напряжения в кабелях отдельных присоединений $\Delta U_{\text{пр}}$ от сборки выводов на щите до приборов и реле отдельных присоединений не должна превышать разности между $\Delta U_{\text{доп}}$ и ΔU, т. е.

$$\Delta U_{\text{пр}} \leqslant \Delta U_{\text{доп}} - \Delta U. \qquad (17)$$

Сечение жил кабелей в цепях напряжения отдельных присоединений выбирается описанным выше способом с использованием (12) и (13), в которые вместо $\Delta U_{\text{доп}}$ подставляется $\Delta U_{\text{пр}}$, и (14) и (15), куда вместо S_{TH} подставляется мощность нагрузки приборов и реле данного присоединения.

Сечение жил кабелей во вторичных цепях напряжения по условию механической прочности согласно ПУЭ не должно быть меньше 1,5 мм² для меди и 2,5 мм² для алюминия.

Выбор автоматов и предохранителей во вторичных цепях трансформаторов напряжения. Автоматы и предохранители выбираются на основе расчетов токов к. з. во вторичных цепях трансформаторов напряжения. *Номинальный ток расцепителя автомата или плавкой вставки предохранителя* выбирается соответствующим наибольшему возможному току длительной нагрузки в его цепи. Последний должен определяться с учетом возможного увеличения нагрузки при резервировании другого трансформатора напряжения.

Кроме того, ток, соответствующий отключающей способности выбранного автомата или предохранителя, должен быть не менее максимального значения тока к. з. в месте установки этого защитного аппарата.

При малых значениях тока нагрузки, как, например, у трансформаторов напряжения 6—20 кВ, работающих в классе точности 0,5 и 0,2, в цепи питания счетчиков (рис. 27) или в цепи дополнительных обмоток, соединенных в разомкнутой треугольник (рис. 26, 27, 28), номинальный ток предохранителя или автомата следует выбирать по его отключающей способности.

Для обеспечения надежного действия предохранителей номинальный ток плавких вставок должен быть меньше минимального значения тока к. з. не менее чем в 4—5 раз.

Коэффициент чувствительности электромагнитного расцепителя (отсечки) автомата — отношение минимального значения тока к. з. к наибольшему току срабатывания этого расцепителя, должен быть не менее 1,5.

Наиболее широкое распространение для защиты трансформаторов напряжения получили автоматы типа АП-50-3М (трехполюсный) и АП-50-2М (двухполюсный) с электромагнитным расцепителем. Отключающая способность этих автоматов $I_{к.макс}$ до 5000 А при напряжении до 380 В. Полное время отключения к. з. $t_{ср}=0{,}017$ с.

Электромагнитные расцепители по заказу выполняются на любое из следующих значений номинального тока: 1,6; 2,5; 4; 6,4; 10; 16; 25; 40; 50 А. При этом расцепители при любом номинальном токе могут иметь любое из двух исполнений по кратности срабатывания: на $11I_{ном}$ с разбросом $8—14I_{ном}$ и на $3{,}5I_{ном}$ с разбросом $3—4I_{ном}$.

Исполнение по току срабатывания должно указываться в заказе; если оно не указано, то поставляется автомат на ток $I_{ср}=11I_{ном}$.

Тепловые расцепители имеют такие же номинальные токи, как и электромагнитные. При этом они начинают работать при токе $1{,}35I_{ном}\pm25\%$ и обеспечивают надежное действие при токе около $1{,}7I_{ном}$.

Для обеспечения должной чувствительности электромагнитных расцепителей при к. з. во вторичных цепях трансформаторов напряжения рекомендуется во всех случаях принимать кратность срабатывания равную 3,5

(минимальная кратность). При этом проверка чувствительности должна производиться с учетом разброса — возможного увеличения тока срабатывания до четырехкратного.

При отсутствии автомата на нужный номинальный ток с кратностью 3,5 допускается производить перемотку его электромагнитных расцепителей в лаборатории энергосистемы или ее предприятия.

Ввиду относительно большого тока срабатывания электромагнитного расцепителя ($3—4I_{ном}$) для повышения чувствительности автомата к удаленным к. з. и внутриаппаратным повреждениям рекомендуется применение автоматов с электромагнитным и тепловым расцепителем.

Выбор автоматов в цепи основных обмоток при включении на линию трансформаторов напряжения типа НКФ должен производиться с учетом необходимости отстройки отсечки автомата от бросков емкостного тока, возникающих при снятии напряжения с линии. Эти кратковременные броски тока проходят во вторичных цепях через автотрансформаторы, предназначенные для регулирования уставок дистанционных защит и могут быть порядка 60—80 А.

Наиболее эффективным способом предотвращения отключения автоматов при указанных бросках емкостного тока следует считать снижение тока этих бросков, например, путем включения резисторов в цепи автотрансформаторов дистанционных защит. При отсутствии таких резисторов рекомендуется загрубление автомата в цепи основных обмоток трансформатора напряжения, для чего ток срабатывания электромагнитного расцепителя принимается равным

$$I_{ср}=k_{н}I_{2C},$$

где $k_{н}$ — коэффициент надежности, равный 1,3; I_{2C} — максимальное значение емкостного тока во вторичных цепях.

При кратности срабатывания 3,5 номинальный ток расцепителя автомата должен быть $I_{ном.расч}=k_{н}I_{2C}/3,5$.

Эффективность такой отстройки от бросков емкостного тока должна проверяться при наладке.

Номинальный ток неселективного автомата, устанавливаемого на щите в цепи удаленных нагрузок (см. рис. 27, 28), рекомендуется всегда принимать равным 2,5 А. При этом обеспечивается надежная работа элек-

тромагнитного расцепителя за сопротивлением провода в одной фазе до 3 Ом. Поскольку при к. з. за таким сопротивлением напряжение в месте установки автомата будет выше $0,9U_{ном}$, вполне допустима ликвидация более удаленных к. з. с помощью теплового расцепителя, который надежно срабатывает (с коэффициентом чувствительности $k_ч \geqslant 1,5$) при повреждении за кабелем с жилами сечением 1,5 мм² длиной до 650 м.

В то же время максимальное значение тока к. з. за этим автоматом всегда будет меньше допустимого по его отключающей способности ($I_{к.з.макс}=400$ А), так как согласно опытным данным ОРГРЭС полное сопротивление автомата АП-50 с $I_{ном}=2,5$ А составляет 0,32 Ом.

Выбор автоматов в цепи дополнительных обмоток, имеющих номинальное напряжение 100/3 В по их отключающей способности, в связи с малым значением сопротивления таких трансформаторов напряжения необходимо производить с учетом сопротивления проводов от выводов трансформатора напряжения до автомата при определении тока к. з.

В цепи $3U_0$ (в проводе *н*) трансформаторов напряжения до 35 кВ (см. рис. 27) должен устанавливаться автомат только с тепловым расцепителем, чтобы не разрывать цепь $3U_0$ при повреждении между проводами *н* — *и*. При отсутствии провода *и* (как, например, в схеме на рис. 26) автомат в цепи $3U_0$ должен иметь только электромагнитный расцепитель.

Определение тока к. з. производится расчетом и в случаях необходимости измерением при включении трансформатора напряжения в работу.

При расчете допускаются следующие упрощения:

не учитывается индуктивное сопротивление вторичных цепей, питаемых от трансформатора напряжения;

не учитывается активное сопротивление обмоток всех трансформаторов напряжения, кроме НДЕ.

Вследствие этого значения тока к. з. получаются несколько завышенными (не более чем на 5—10%), что не выходит за пределы допустимой погрешности расчета.

Для определения тока к. з. должны быть известны активные сопротивления проводов и значения сопротивления $z_к$ или напряжения короткого замыкания $u_к$ трансформатора напряжения. Ориентировочные значения $u_к$ трансформаторов отечественного производства приведены в табл. 1 и 3. Значение сопротивления $z_к$, приведен-

ное к обмотке низшего напряжения, определяется по выражению, Ом:

$$z_к = \frac{u_к\% U^2_{ном}}{100S}, \tag{18}$$

где $u_к$ — напряжение короткого замыкания, %; $U_{ном}$ — номинальное напряжение вторичной обмотки трансформатора напряжения, В; S — мощность трансформатора напряжения, к которой отнесено $u_к$, В·А.

Максимальный ток, отключаемый автоматом или предохранителем, определяется, как правило, при трехфазном к. з. на выводах трансформатора.

При соединении трансформатора в открытый треугольник максимальный ток:

$$I^{(3)} = 100/z_к. \tag{19}$$

При схеме звезда — звезда

$$I^{(3)} = U_{мф}/\sqrt{3}\,z_к, \tag{20}$$

где $U_{мф}$ — номинальное междуфазное напряжение вторичной цепи (в большинстве случаев $U_{мф}$=100 В, при применении трансформаторов типа ЗОМ для цепей дополнительных обмоток $U_{мф}$=173 В).

При включении трехфазного трансформатора напряжения по схеме звезда — звезда с выведенным нулем (рис. 25,*б*) максимальный ток в цепи основных обмоток будет при однофазном к. з., когда со стороны высшего напряжения любая другая фаза замкнута на землю. При этом

$$I^{(1)} = 100/z_к. \tag{21}$$

При включении однофазных трансформаторов напряжения с номинальным напряжением вторичных обмоток 100 В по схеме звезда — разомкнутый треугольник в случае замыкания проводов всех трех фаз ток в проводах *и* — *ф*

$$I^{(3)} = \sqrt{3}\,100/z_к. \tag{22}$$

Следует иметь в виду, что действительное значение максимального тока на выводах трансформатора напряжения типа НДЕ значительно меньше рассчитанного по выражениям (20) и (22) вследствие насыщения реактора в первичной цепи трансформатора напряжения. Поэтому для НДЕ, согласно данным ВНИИЭ, следует при-

нимать максимальный ток к. з. в цепи основных обмоток равным 168 А и в проводах *и*, *ф* дополнительных обмоток $\sqrt{3} \cdot 87$ А.

Наибольшее значение тока в цепи автомата в проводе *и* трансформатора напряжения 35 кВ (см. рис. 27,*а*) определяется в режиме однофазного замыкания на землю на стороне 35 кВ, когда напряжение неповрежденных фаз *B*, *C* относительно земли повышается в $\sqrt{3}$ раз. При этом при замыкании между проводами *и* — *b*

$$I_{\text{макс}} = \frac{100}{2\sqrt{z^2_{\text{к}} + r^2_{\text{пр}}}}, \tag{23}$$

где $r_{\text{пр}}$ — сопротивление одного провода от трансформатора напряжения до автомата.

Максимальный ток через автомат в цепи $3U_0$ при к. з. в этой цепи непосредственно за автоматом и однофазном замыкании на землю в сети высшего напряжения:

$$I_{\text{макс}} = \frac{100}{\sqrt{(3z_{\text{к}})^2 + (2r_{\text{пр}})^2}}; \tag{24}$$

здесь $r_{\text{пр}}$ — то же, что и в (23).

Минимальный ток рассчитывается при к. з. в наиболее удаленной точке вторичных цепей.

При соединении трансформаторов напряжения в открытый треугольник минимальный ток будет при двухфазном к. з. между незаземленными фазами, а в схеме звезда — звезда без нулевого провода — при двухфазном к. з. между любыми фазами. При включении вторичных обмоток однофазных трансформаторов напряжения в разомкнутый треугольник минимальный ток будет при к. з. между одним из выводов цепи $3U_0$ и проводом, выведенным от точки соединения двух других фаз дополнительных обмоток (например, между проводами *и* — *к* или *н* — *ф* в схеме на рис. 28,*а*). Во всех этих случаях

$$I^{(2)} = \frac{U_{\text{мф}}}{2\sqrt{z^2_{\text{к}} + r^2_{\text{пр}}}}. \tag{25}$$

При соединении трансформатора напряжения по схеме звезда — звезда с выведенным нулем минимальный ток будет при однофазном к. з.:

$$I^{(1)} = \frac{100/\sqrt{3}}{\sqrt{z^2_{\text{к}} + (\Sigma r_{\text{пр}} + \Sigma r_{\text{опр}})^2}}. \tag{26}$$

Сопротивления проводов в фазе ($\Sigma r_{пр}$) и в нуле ($\Sigma r_{0пр}$) указаны отдельно, так как сечение жил кабеля в фазе и нуле может быть различным (при прокладке от трансформатора напряжения до щита четырехжильного силового кабеля).

Для трансформатора напряжения типа НДЕ минимальный ток через автомат в проводах *н — ф* может подсчитываться по выражению

$$I^{(2)}=\frac{U_{мф}}{2\,(z_{к}+r_{п})_{р}}, \qquad (27)$$

а ток через автомат в цепи основных обмоток

$$I^{(1)}=\frac{100/\sqrt{3}}{z_{к}+(\Sigma r_{пр}+\Sigma r_{опр})}. \qquad (28)$$

Однако из-за насыщения реактора вычисление тока к. з. по этим выражениям с приемлемой точностью может производиться лишь при токах в основной обмотке до 60 А и в дополнительной — до 30 А. Если для обеспечения необходимой чувствительности электромагнитных расцепителей ($k_{ч}\geqslant 1{,}5$) токи должны быть больше указанных, их значения необходимо уточнить измерением.

По результатам определения минимальных значений тока к. з. оценивается чувствительность электромагнитных расцепителей, для чего вычисляется коэффициент чувствительности

$$k_{ч}=I_{к.з.мин}/I_{уст.макс}; \qquad (29)$$

для автоматов АП-50

$$k_{ч}=I_{к.з.мин}/4I_{ном.расц}. \qquad (30)$$

В тех случаях, когда электромагнитный расцепитель автомата при к. з. за кабелем удаленной нагрузки (измерительные приборы, цепи синхронизации) окажется нечувствительным, допустимо ликвидировать повреждение за этим кабелем с помощью теплового расцепителя, если при минимальном токе этого повреждения напряжение на щите (в начале кабеля удаленной нагрузки) будет не ниже $0{,}9U_{ном}$. При более глубоком понижении напряжения или при недостаточной чувствительности теплового расцепителя ($k_{ч}<1{,}5$) необходимо установить неселективный автомат в цепи этого кабеля.

При проверке чувствительности теплового расцепителя автомата АП-50 вместо тока срабатывания электромагнитного расцепителя в (29) следует подставлять $1{,}7I_{ном.расц}$.

Ликвидация к. з. даже на наиболее удаленных панелях реле защиты и автоматики с помощью теплового расцепителя недопустима. Поэтому при недостаточной чувствительности электромагнитного расцепителя следует для повышения коэффициента чувствительности до $k_ч \geqslant 1{,}5$ увеличить ранее выбранное по допустимой потере напряжения сечение жил кабелей до этой панели.

Ниже приводятся примеры расчета.

Пример 1. Для питания активных счетчиков на шести отходящих линиях от одной секции 6 кВ и питающем трансформаторе, указывающего вольтметра и реле напряжения типа РН-54/160 в схеме АВР установлены два трансформатора напряжения НОМ-6, 6000/100 В. Трансформаторы напряжения включены по схеме открытого треугольника. Все счетчики вынесены в одно место и соединяются с трансформатором напряжения кабелем длиной 12 м. К вольтметру и реле (на щит) напряжение подается по кабелю длиной 32 м. Требуется определить нагрузку на трансформаторы напряжения, выбрать сечение жил кабелей и предохранители во вторичных цепях трансформатора напряжения. На счетчики подаются напряжения U_{ab} и U_{bc}, на вольтметр и реле напряжения U_{ca}. Трансформатор напряжения включается по схеме, показанной на рис. 24,*б*.

Потребление счетчиков $S_{ab}=S_{bc}=7\cdot 6=42$ В·А, потребление вольтметра 7 В·А. Реле РН-54/160 при 40 В потребляет 1 В·А, а при 100 В согласно (5)

$$S_р=\left(\frac{100}{40}\right)^2\cdot 1=6{,}25 \text{ В·А}; \quad S_{ca}=7+6{,}25=13{,}25 \text{ В·А}.$$

Наибольшая нагрузка на трансформатор напряжения согласно (9)

$$S_{ТН\ макс}=S_{макс.мф}+0{,}73S_{мин.мф}=42+0{,}73\cdot 13{,}25=51{,}7 \text{ В·А}.$$

Это превышает мощность трансформатора напряжения в классе точности 0,5, равную 50 В·А. В связи с этим вольтметр и реле необходимо переключить на напряжение U_{ab} и U_{bc}, тогда

$$S_{ТН\ макс}=(42+7)+0{,}73\cdot 0=49 \text{ В·А},$$

что допустимо.

Ток нагрузки в питающем счетчики кабеле (в фазе *b*) согласно (14) составит:

$$I_{нагр}=\sqrt{3}\,S_{ТН}/U_{ном}=\sqrt{3}\,(42+0{,}73\cdot 0)/100=0{,}725 \text{ А}.$$

Сопротивление жилы кабеля согласно (12)

$$r_{пр.макс}=\Delta U_{доп}/\sqrt{3}\,I_{нагр}=0{,}5/\sqrt{3}\cdot 0{,}725=0{,}462 \text{ Ом}.$$

Сечение алюминиевой жилы кабеля согласно (16)

$$q = l/\gamma r_{\text{пр.макс}} = 12/34{,}5 \cdot 0{,}462 = 0{,}955 \text{ мм}^2.$$

Ток нагрузки в питающем вольтметр и реле кабеле (в фазе b)

$$I_{\text{нагр}} = \sqrt{3}\ (13{,}25 + 0{,}73 \cdot 0)/100 = 0{,}23 \text{А}.$$

Сопротивление жилы кабеля

$$r_{\text{пр.макс}} = 1{,}5/\sqrt{3} \cdot 0{,}23 = 3{,}79 \text{ Ом}.$$

Необходимое сечение жилы кабеля

$$q = 32/34{,}5 \cdot 3{,}79 = 0{,}244 \text{ мм}^2.$$

Для обоих кабелей принимается минимальное сечение по условию механической прочности $q = 2{,}5$ мм^2.

При этом сопротивление кабеля до счетчиков

$$r_{\text{пр}} = 12/34{,}5 \cdot 2{,}5 = 0{,}139 \text{ Ом},$$

и потеря напряжения согласно (12)

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot 0{,}625 \cdot 0{,}139 = 0{,}15 \text{ В} \quad \text{или} \quad \Delta U = 0{,}15\%.$$

Полное сопротивление трансформатора напряжения согласно (18) по данным табл. 1

$$z_{\text{к}} = \frac{u_{\text{к}}\% U^2_{\text{ном}}}{100 S} = \frac{6{,}15 \cdot 100^2}{100 \cdot 400} = 1{,}53 \text{ Ом}.$$

Максимальный ток к. з. согласно (19)

$$I^{(3)} = 100/z_{\text{к}} = 100/1{,}53 = 65{,}3 \text{ А}.$$

Выбираем предохранитель типа НПН-15 с неограниченной отключающей способностью.

Сопротивление до наиболее удаленной точки (жила кабеля до щита)

$$r_{\text{пр}} = 32/34{,}5 \cdot 2{,}5 = 0{,}372 \text{ Ом}.$$

Минимальный ток к. з. согласно (25)

$$I^{(2)} = \frac{U_{\text{мф}}}{2\sqrt{z^2_{\text{к}} + r^2_{\text{пр}}}} = \frac{100}{\sqrt{1{,}53^2 + 0{,}372^2}} = 31{,}9 \text{ А}.$$

Выбираем плавкую вставку с наименьшим номинальным током $I_{\text{ном}} = 6$ А.

Надежность сгорания предохранителя

$$k_{\text{н}} = I^{(2)}_{\text{мин}} / I_{\text{ном}} = 31{,}9/6 = 5{,}32,$$

что приемлемо (время сгорания вставки не более 1 с).

Пример 2. Трансформатор напряжения типа НКФ-220 на 220 кВ включается по схеме, показанной на рис. 28. Все вторичные нагрузки основных обмоток включаются на линейные напряжения. Длина кабелей от трансформатора напряжения до его шкафа 12 м и от шкафа до щита защиты 100 м. Наиболее удаленная от сборки зажимов на щите панель защиты питается по кабелю длиной 20 м. От щита защиты для питания измерительных приборов проложены кабели на щит управления. Длина наиболее протяженного кабеля $l = 180$ м.

Выбрать сечение жил кабелей по условию полного использования мощности трансформатора напряжения в классе точности 1. Нагрузку панели защиты на основные обмотки трансформатора напряжения принять 55 В·А на фазу (при 100 В), а на дополнительные обмотки 15 В·А при 100 В. Нагрузку от измерительных приборов, питаемых по наиболее протяженному кабелю, принять равной $S_{ab}=S_{bc}=10$ В·А. Выбрать автоматы и уставки их расцепителей.

Ток нагрузки по кабелю от основных обмоток трансформатора напряжения до щита согласно (14)

$$I_{\text{нагрТН}}=\sqrt{3}\cdot 600/100=10{,}4 \text{ А}.$$

Сопротивление жилы этого кабеля согласно (12)

$$I_{\text{пр.макс}}=1{,}5/\sqrt{3}\cdot 10{,}4=0{,}083 \text{ Ом}.$$

Сечение алюминиевой жилы кабеля согласно (16)

$$q=\frac{100+2\cdot 12}{34{,}5\cdot 0{,}083}=43{,}3 \text{ мм}^2.$$

Принимаем кабель сечением 3×50+1×25 мм² (сечение фазных проводов по 50 мм² и нулевого 25 мм²).

Сопротивление жил выбранного кабеля

$$r_{\text{пр}}=\frac{100+2\cdot 12}{34{,}5\cdot 50}=0{,}072 \text{ Ом}$$

$$r_{\text{опр}}=\frac{100+2\cdot 12}{34{,}5\cdot 25}=0{,}144 \text{ Ом}.$$

Потеря напряжения

$$\Delta U=\sqrt{3}\, I_{\text{нагр.ТН}} r_{\text{пр}}=\sqrt{3}\cdot 10{,}4\cdot 0{,}072=1{,}29 \text{ В}.$$

Допустимая потеря напряжения в кабелях от щита до панелей защиты согласно (17)

$$\Delta U_{\text{пр}}=\Delta U_{\text{доп}}-\Delta U=3-1{,}29=1{,}71 \text{ В}.$$

Ток нагрузки в кабеле, питающем панель защиты, согласно (14)

$$I_{\text{нагр.защ}}=\sqrt{3}\cdot 55/100=0{,}95 \text{ А}.$$

Максимальное допустимое сопротивление жилы этого кабеля согласно (12)

$$r_{\text{пр}}=1{,}71/\sqrt{3}\cdot 0{,}95=1{,}04 \text{ Ом}$$

и сечение его медной жилы

$$q=20/57\cdot 1{,}04=0{,}338 \text{ мм}^2.$$

Принимаем $q=1{,}5$ мм², при этом $r_{\text{пр.защ}}=\frac{20}{57\cdot 1{,}5}=0{,}234$ Ом.

Допустимая потеря напряжения в кабеле до измерительных приборов

$$\Delta U_{\text{пр}}=1{,}5-1{,}29=0{,}21 \text{ В}.$$

Ток нагрузки в этом кабеле

$$I_{\text{нагр.приб}} = \sqrt{3} \cdot 10/100 = 0,173 \text{ А}.$$

Максимальное допустимое сопротивление жилы кабеля

$$r_{\text{пр}} = 0,21/\sqrt{3} \cdot 0,173 = 0,7 \text{ Ом},$$

$$q = 180/57 \cdot 0,7 = 4,5 \text{ мм}^2.$$

Принимаем $q = 6$ мм², при этом

$$r_{\text{пр.приб}} = 180/57 \cdot 6 = 0,526 \text{ Ом}.$$

Сопротивление $z_к$ трансформатора напряжения между обмотками ВН и основной НН согласно (18) и данным табл. 1

$$z_к = \frac{4,13\,(100/\sqrt{3})^2}{100 \cdot 2000} = 0,069 \text{ Ом}.$$

Сопротивление между обмотками ВН и дополнительной НН

$$z_к = \frac{4,13 \cdot 100^2}{100 \cdot 2000} = 0,207 \text{ Ом}.$$

Максимальное значение тока к. з.:
на выводах основных обмоток по (20)

$$I^{(3)} = 100/\sqrt{3} \cdot 0,069 = 840 \text{ А};$$

на выводах дополнительных обмоток по (22)

$$I^{(3)} = \sqrt{3} \cdot 100/0,207 = 840 \text{ А}.$$

Выбираем автоматы типа АП-50. Номинальный ток автомата *1А* (рис. 28) должен быть не менее двойного тока нагрузки (с учетом резервирования *2ТН*):

$$I_{\text{ном}} \geqslant 2I_{\text{нагр ТН}} = 2 \cdot 10,4 = 20,8 \text{ А}.$$

Принимаем $I_{\text{ном}} = 25$ А. При этом отключающая способность $I_{\text{к.з.макс}} = 3000$ А. Автомат *2А* выбираем с $I_{\text{к.з.макс}} = 2000$ А на номинальный ток 10 А.

Минимальные значения тока к. з. в цепи основных обмоток:
на панели защиты по (26)

$$I^{(1)} = \frac{100/\sqrt{3}}{\sqrt{0,069^2 + [(0,072 + 0,234) + (0,144 + 0,234)]^2}} = 84 \text{ А}.$$

Коэффициент чувствительности электромагнитного расцепителя согласно (30):

$$k_ч = 84/4 \cdot 25 = 0,84.$$

Расцепитель нечувствителен. Для обеспечения его надежности действия необходимо увеличить минимальный ток к. з. до

$$I_{\text{мин}} \geqslant k_ч 4 I_{\text{ном}} = 1,5 \cdot 4 \cdot 25 = 150 \text{ А}.$$

Для этого суммарное сопротивление жил кабелей, учитываемое в (26), должно быть:

$$\sum r = \sqrt{\left(\frac{100/\sqrt{3}}{150}\right)^2 - 0{,}069^2} = 0{,}38 \text{ Ом}.$$

Это может быть достигнуто при уменьшении сопротивления жилы кабеля на участке между щитом и панелью защиты до

$$r_{\text{пр.защ}} = \frac{0{,}38 - (0{,}072 + 0{,}144)}{2} = 0{,}082 \text{ Ом}.$$

Сечение жил этого кабеля должно быть:

$$q = 20/57 \cdot 0{,}082 = 4{,}27 \text{ мм}^2.$$

Принимается $q = 6$ мм^2 вместо ранее выбранного $q = 1{,}5$ мм^2, тогда

$$r_{\text{пр.защ}} = 20/57 \cdot 6 = 0{,}058 \text{ Ом};$$

при этом минимальный ток

$$I^{(1)} = \frac{100/\sqrt{3}}{\sqrt{0{,}069^2 + [(0{,}072 + 0{,}058) + (0{,}144 + 0{,}058)]^2}} = 171 \text{ А};$$

а

$$k_\text{ч} = 171/4 \cdot 25 = 1{,}71.$$

У наиболее удаленных измерительных приборов согласно (25) определяется ток двухфазного к. з., так как к приборам нуль не подается и однофазное к. з. в месте их установки невозможно:

$$I^{(2)} = \frac{100}{2\sqrt{0{,}069^2 + (0{,}072 + 0{,}526)^2}} = 83{,}5 \text{ А}.$$

Электромагнитный расцепитель нечувствителен, так как

$$k_\text{ч} = 83{,}5/4 \cdot 25 = 0{,}835.$$

Чувствительность теплового расцепителя удовлетворительная:

$$k_\text{ч} = 83{,}5/1{,}7 \cdot 25 = 1{,}96 > 1{,}5.$$

Напряжение на щите при к. з. за кабелем удаленной нагрузки

$$U_\text{мф} = 2I^2 r_{\text{пр.приб}} = 2 \cdot 83{,}5 \cdot 0{,}526 = 88 \text{ В}.$$

Так как напряжение ниже $0{,}9U_\text{ном}$, целесообразно в цепи кабеля измерительных приборов установить неселективный автомат на 2,5 А.

Проверять чувствительность этого автомата не требуется, поскольку его электромагнитный расцепитель надежно работает при $r_\text{пр}$ до 3 Ом, а в данном случае $r_{\text{пр.приб}} = 0{,}526$ Ом.

Наибольший ток нагрузки по кабелю от дополнительных обмоток (в цепи $3U_0$) до щита защиты при однофазном к. з. согласно (15)

$$I_{\text{нагрТН}} = \frac{500}{100} = 5 \text{ А}.$$

Сопротивление жилы кабеля согласно (13) должно быть:

$$r_{\text{пр.макс}} = \frac{\Delta U_{\text{доп}}}{2I_{\text{нагр ТН}}} = \frac{3}{2 \cdot 5} = 0,3 \text{ Ом};$$

требуемое сечение жилы кабеля

$$q = \frac{100 + 2 \cdot 12}{57 \cdot 0,3} = 7,25 \text{ мм}^2.$$

Принимаем сечение кабеля 4×10 мм².

Сопротивление жилы выбранного кабеля и потеря напряжения в нем

$$r_{\text{пр}} = \frac{100 + 2 \cdot 12}{57 \cdot 10} = 0,218 \text{ Ом};$$

$$\Delta U = I_{\text{нагр ТН}} 2 r_{\text{пр}} = 5 \cdot 2 \cdot 0,218 = 2,18 \text{ В}.$$

Допустимая потеря напряжения в кабеле от сборки выводов на щите до наиболее удаленной панели защиты

$$\Delta U_{\text{пр}} = \Delta U_{\text{доп}} - \Delta U = 3 - 2,18 = 0,82 \text{ В}.$$

Ток нагрузки в кабеле, питающем панель защиты,

$$I_{\text{нагр.защ}} = S_{\text{защ}}/100 = 15/100 = 0,15 \text{ А}.$$

Наибольшее допустимое сопротивление этого кабеля

$$r_{\text{пр.макс}} = 0,82/0,15 = 5,46 \text{ Ом};$$

$$q = 20/57 \cdot 5,46 = 0,065 \text{ мм}^2.$$

Принимаем $q = 1,5$ мм², при этом

$$r_{\text{пр.защ}} = \frac{20}{57 \cdot 1,5} = 0,234 \text{ Ом}.$$

Минимальный ток при к. з. на панели защиты согласно (25)

$$I^{(2)} = \frac{100}{2\sqrt{0,207^2 + (0 \cdot 218 + 0,234)^2}} = 100 \text{ А}.$$

Коэффициент чувствительности электромагнитного расцепителя

$$k_{\text{ч}} = 100/4 \cdot 10 = 2,5,$$

что вполне удовлетворительно ($k_{\text{ч}} > 1,5$).

Согласно полученным результатам должны быть применены автоматы *1А* — типа АП-50-3МТ на ток $I_{\text{ном}} = 25$ А, *2А* — типа АП-50-3МТ на ток $I_{\text{ном}} = 10$ А и *3А* — типа АП-50-3МТ, на ток $I_{\text{ном}} = 2,5$ А. Все три автомата — с тепловыми и электромагнитными расцепителями, кратность срабатывания последних 3,5.

9. МОНТАЖ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ И ИХ ВТОРИЧНЫХ ЦЕПЕЙ

Особенности монтажа. Перед установкой каждый трансформатор напряжения должен быть тщательно осмотрен. При этом должно быть обращено особое внимание на состояние изоляции, контактов выводов ВН и НН, на исправность бака, всех креплений и наличие гаек и шайб. При наличии дефектов, препятствующих включению трансформатора напряжения в работу, его установка не допускается. Мелкие неисправности могут быть устранены на месте до начала монтажа. В случае отсутствия пломб трансформатор напряжения должен пройти контрольные испытания с участием представителя Государственного комитета стандартов, мер и измерительных приборов.

При установке трансформаторов напряжения должен обеспечиваться свободный доступ к выводам вторичной обмотки.

Заземляемые выводы обмоток ВН трансформаторов должны соединяться непосредственно с контуром заземления. Баки трансформаторов напряжения должны заземляться отдельно.

У трансформаторов напряжения типа НКФ на 220 кВ и выше необходимо особо тщательно проверить правильность установки перемычек, соединяющих обмотки и экраны блоков. У всех трансформаторов напряжения НКФ проверяется состояние уплотнений проходных изоляторов, через которые выводятся вторичные обмотки и секции первичных обмоток.

Ввод кабелей в коробку выводов каскадных трансформаторов напряжения типа НКФ должен производиться через предусмотренный для этого сальник с надежным уплотнением. Крышки коробки должна иметь водостойкие прокладки и плотно закрываться.

У трансформатора напряжения типа НДЕ-500 и НДЕ-750 проверяется правильность положения переключателей отпаек трансформатора напряжения и реактора. Проверка производится по данным заводского паспорта. Если значение емкости конденсаторов отличается от значений, указанных в заводском паспорте (например, из-за замены неисправного конденсатора), то производится пересчет коэффициента деления и подбор положений переключателей по указаниям завода-изготовителя.

Автоматы или предохранители, устанавливаемые во вторичных цепях, должны размещаться по возможности ближе к трансформатору напряжения, с тем чтобы незащищенные кабели от трансформатора напряжения до защитных аппаратов были возможно короче.

Кабели между выводами вторичных обмоток трансформаторов напряжения и шкафом с предохранителями или автоматами должны быть надежно защищены от механических повреждений. При прокладке кабелей в трубах необходимо исключить возможность скопления в них влаги, которая при замерзании может повредить кабели. Для этого конструкции для защиты кабелей от механических повреждений должны свободно пропускать воду.

Кабели с бумажной изоляцией, присоединяемые к выводам вторичных обмоток трансформаторов напряжения для открытой установки, главным образом типов НОМ-35, ЗНОМ-35-65 и подобных им, должны разделываться в кабельной воронке наружной установки. Жилы кабеля из воронки должны выводиться через фарфоровые втулки с боковой стороны воронки. Втулки должны быть наклонены вниз, чтобы через них в воронку не попадала вода. Верхняя часть воронки должна иметь крышку, закрываемую после заливки кабеля. С жил кабеля внутри воронки должна быть полностью снята бумажная или резиновая изоляция. Взамен ее надеваются масло- и водостойкие изоляционные трубки. Часть жилы длиной 1—2 см остается без изоляции и заливается мастикой.

Воронка устанавливается выше верхней крышки трансформатора напряжения так, чтобы жилы кабеля выходили из воронки вниз. Такая разделка предохраняет изоляцию кабеля от повреждений маслом и водой.

Кабели с бумажной изоляцией могут разделываться аналогично разделке силовых кабелей с заливкой места разделки эпоксидной смолой. Для кабелей с влаго- и маслостойкой изоляцией допускается и сухая разделка, обеспечивающая защиту изоляции жил от воздействия влаги, масла, прямого солнечного света и т. п.

После присоединения жил кабеля к выводам трансформатора напряжения воронку и выводы следует закрыть общим съемным кожухом.

При монтаже на открытых РУ шкафов с рубильниками и автоматами или предохранителями должна быть

обеспечена надежная защита аппаратуры от атмосферных осадков.

Предохранители во вторичных цепях трансформаторов напряжения должны быть трубчатые типа НПН или ПР. Установка пробочных предохранителей не разрешается.

Заземление вторичных обмоток трансформатора напряжения (глухое или через пробивной предохранитель) должно устанавливаться на ближайшей к нему сборке зажимов и выполняться медным проводом сечением не менее 4 мм^2 или алюминиевым проводом не менее 6 мм^2. Сечение жил кабелей, соединяющих фазу *b* отдельных трансформаторов напряжения с заземляемой на щите общей шинкой (*b*600 на рис. 22), также должно быть не менее 4 мм^2 по меди или 6 мм^2 по алюминию.

Заземление общей шинки на щите для надежности следует выполнять на трех — пяти соседних панелях.

Для заземления вторичных обмоток трансформаторов напряжения, используемых для питания оперативных цепей переменного тока, должны применяться пробивные предохранители типа ПП/А-3,500, пробивное напряжение которых равно 700—1000 В.

Эксплуатация трансформаторов напряжения. По окончании монтажа трансформаторов напряжения производится проверка их исправности, правильности установки и схемы включения. Одновременно проверяются все элементы вторичных цепей напряжения и правильность сборки схемы этих цепей. По результатам этих проверок оценивается допустимость включения трансформаторов напряжения в работу и производится их приемка в эксплуатацию.

Для проверки исправности трансформатора напряжения измеряется сопротивление изоляции его обмоток, испытывается повышенным напряжением электрическая прочность изоляции обмоток ВН (не имеющих ослабленной изоляции одного из выводов) и обмоток НН (вместе с вторичными цепями), измеряется ток холостого хода со стороны вторичной обмотки; у маслонаполненных трансформаторов напряжения производятся проверка электрической прочности и химический анализ масла.

Значения испытательных напряжений для обмоток ВН приведены ниже:

$U_{ном}$, кВ	3	6	10	15	20	35	110
$U_{исп}$, кВ	22	29	38	49	58	85	180

Испытательное напряжение прикладывается к разземленной обмотке ВН в течение 1 мин.

Трансформаторы напряжения 110 кВ и выше типа НКФ, а также трансформаторы на меньшие напряжения типов ЗНОЛ, ЗНОМ и ЗОМ имеют ослабленную изоляцию одного из выводов обмотки ВН и повышенным напряжением не испытываются.

Ток холостого хода измеряется при номинальном напряжении, и его значение не нормируется. Это испытание производится с целью проверки отсутствия в трансформаторе витковых замыканий.

У трансформаторов напряжения НКФ 220—500 кВ кроме указанных испытаний проверяется сопротивление постоянному току связующих обмоток, которое не должно отличаться от паспортных данных более чем на 2%.

Трансформаторы типа НДЕ-500 и НДЕ-750 испытываются по указаниям инструкции завода-изготовителя.

При капитальных ремонтах трансформаторов напряжения выполняются те же испытания, что и при приемке в эксплуатацию, за исключением измерения тока холостого хода.

При текущих ревизиях измеряется сопротивление изоляции обмоток и у маслонаполненных трансформаторов напряжения проверяются состояние масла и его уровень; при необходимости производится доливка масла. Значительное потемнение масла и потеря его прозрачности указывают на наличие внутренних разрядов, постепенно разрушающих изоляцию.

Отбор проб масла из трансформаторов напряжения 20 кВ и выше для проверки электрической прочности и химического анализа производится с периодичностью, установленной согласно Правилам технической эксплуатации (ПТЭ), и совмещается с ревизиями трансформаторов. Из маслонаполненных трансформаторов до 20 кВ пробы масла не отбираются, и оно заменяется при отрицательных результатах профилактических испытаний изоляции.

После ремонта поврежденного трансформатора напряжения он подвергается таким же испытаниям, как при приемке в эксплуатацию. Дополнительно производятся государственная поверка его класса точности и клеймение.

В случаях перемотки или отсоединения обмоток проверяется полярность их выводов.

Для оценки исправности вторичных цепей трансформатора напряжения при приемке его в эксплуатацию выполняют:

проверку схемы соединений трансформатора напряжения и его цепей от выводов вторичных обмоток до сборок зажимов на панелях отдельных присоединений;

проверку изоляции вторичных обмоток и цепей измерением ее сопротивления и испытанием электрической прочности;

осмотр и проверку исправности заземляющих пробивных предохранителей;

проверку или ревизию переключающей аппаратуры (рубильники, блок-контакты разъединителей, реле-повторители);

проверку автоматов и их работы или надежности сгорания предохранителей;

проверку аппаратуры контроля исправности цепей напряжения;

измерение вторичной нагрузки и потери напряжения;

измерение линейных и фазных напряжений и напряжения небаланса в схеме разомкнутого треугольника;

проверку рабочим напряжением правильности маркировки вторичных цепей;

проверку фазировки трансформаторов напряжения, питающих общие вторичные цепи.

Сопротивление изоляции полностью собранных вторичных цепей напряжения относительно земли должно быть не ниже 1 МОм; оно должно измеряться мегаомметром на 2500 или 1000 В. Электрическая прочность изоляции вторичных цепей проверяется напряжением переменного тока 1 кВ в течение 1 мин, прикладываемым к полностью собранным цепям и земле. Заземление вторичных цепей (как глухое, так и через пробивные предохранители) на время этой проверки отсоединяется.

Исправность пробивных предохранителей проверяется мегаомметром на 500 В или напряжением переменного тока 500—600 В от испытательной установки.

Надежность работы автоматов или сгорания предохранителей проверяется при включении рубильником закоротки, устанавливаемой в наиболее удаленной от трансформатора напряжения точке вторичных цепей между их проводами соответственно виду повреждения при минимальном токе к. з. Значение тока к. з. должно измеряться амперметром или осциллографом. Допуска-

ется взамен этой проверки выполнять расчетную проверку по результатам измерений сопротивления трансформатора напряжения и его вторичных цепей. Особенности методики проверки трансформаторов напряжения и их вторичных цепей изложены ниже (см. п. 10).

Не реже чем 1 раз в 3 года должна проводиться полная проверка вторичных цепей трансформатора напряжения. При полной проверке производится тщательный осмотр вторичных цепей и аппаратуры (автоматы, рубильники, реле контроля и т. д.) с чисткой изоляции и проверкой контактных соединений; проверяется изоляция вторичных цепей (проверку электрической прочности изоляции допускается производить мегаомметром на 2500 В); проверяются автоматы и реле контроля при подаче питания от постороннего источника тока; под рабочим напряжением измеряются линейные и фазные напряжения и напряжение в схеме разомкнутого треугольника.

В случае замены или ремонта трансформаторов напряжения они проверяются в полном объеме, как при новом включении.

При разборке вторичных цепей при ревизии производится проверка правильности соединений осмотром и прозвонкой, а затем рабочим напряжением.

При изменении вторичной нагрузки трансформаторов напряжения (например, замена или подключение новых приборов и реле) должна проверяться расчетом точность их работы.

Во время работы трансформаторов напряжения за ними ведется периодическое наблюдение. При этом контролируются чистота поверхности основной изоляции, отсутствие разрядов и искрения на поверхности изоляторов, общее состояние первичных и вторичных цепей и подключенной к ним аппаратуры.

При выявлении существенных дефектов, например сильного загрязнения изоляции, течи масла, трещин на изоляторах и т. п., трансформатор напряжения должен быть выведен из работы для их устранения.

При нарушении исправности цепей трансформаторов напряжения, выявляемых по действию сигнализации или с помощью устройств периодического контроля (измерение $U_{\text{нб}}$ в цепи $3U_0$), должны приниматься меры для быстрейшего восстановления этих цепей согласно указаниям инструкции для оперативного персонала.

Обслуживание устройств защиты и автоматики, имеющих цепи напряжения, оперативным персоналом должно вестись на основе инструкций, предусматривающих правильный порядок операций, исключающий ложные действия защиты из-за прекращения подачи напряжения. При оперативных переключениях в первичных цепях также необходимо соблюдать порядок операций, обеспечивающий постоянное наличие напряжения на устройствах защиты и автоматики. В инструкциях для оперативного персонала также должны быть предусмотрены действия персонала при исчезновении напряжения на защите и порядок оперативных переключений цепей напряжения на питание от резервного трансформатора напряжения.

10. ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПРОВЕРОК ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ И ИХ ВТОРИЧНЫХ ЦЕПЕЙ

Проверка однополярных выводов обмоток. Определение однополярных выводов однофазных трансформаторов производится по схеме, показанной на рис. 36,*а*. Для определения однополярных выводов подбирается такое включение батареи или прибора, чтобы при замыкании рубильника стрелка прибора отклонялась вправо по шкале. Тогда выводы трансформатора, к которым присоединены зажимы плюс батареи и плюс прибора, будут однополярными.

Однополярные выводы трехфазных пятистержневых трансформаторов напряжения, имеющих выведенные нулевые точки звезды обмоток, определяются по схеме на рис. 36,*б*.

При подключении гальванометра к той же фазе, к которой подключена батарея, и при правильном обозначении полярности стрелка гальванометра при замыкании рубильника отклонится вправо. При переключении гальванометра на другие фазы и замыкании рубильника стрелка гальванометра будет отклоняться влево и на меньшую величину. Таким образом могут быть также определены одноименные фазы первичных и вторичных обмоток.

Определение однополярных выводов обмоток, соединенных по схеме разомкнутого треугольника, производится аналогично по схеме рис. 36,*в*.

При поочередном подключении ко всем трем вводам первичной обмотки плюса батареи стрелка гальванометра должна отклоняться вправо.

Трехфазные трансформаторы напряжения, не имеющие выведенной нулевой точки первичной обмотки, проверяются по схеме, приведенной на рис. 36,*г*. Батарея включается на выводы *А* и *В*. Гальванометр подключается к нулю и поочередно к выводам *a*, *b*, *c*. При правильном обозначении полярности и включении гальвано-

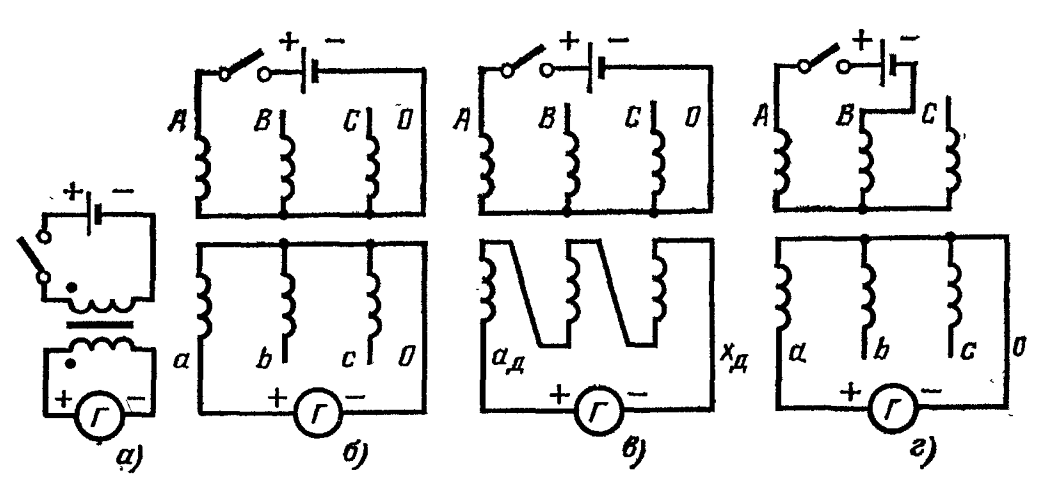


Рис. 36. Определение однополярных выводов трансформаторов напряжения.

метра на вывод *a* его стрелка отклонится вправо, при включении на вывод *c* — влево, при включении на вывод *b* — незначительно в любую сторону. Такие измерения проверяются 3 раза при включении батареи на выводы *А* и *В*, *В* и *С*, *С* и *А*. Необходимо строго соблюдать одинаковый порядок включения батареи: ее плюс должен подключаться к выводам *А*, *В*, *С*, а минус — к выводам *В*, *С*, *А* соответственно.

Определение сопротивлений $z_к$ трансформатора напряжения и проводов во вторичных цепях. Значения этих сопротивлений необходимы при определении токов к. з. и потерь напряжения во вторичных цепях.

Определение сопротивления проводов и жил кабеля может производиться методом амперметра и вольтметра, мостиком любого типа или другими общеизвестными способами. Если ожидаемое сопротивление проводов менее чем 1 Ом, то лучшие результаты дает измерение их сопротивления мостиком типа УМВ.

Сопротивление однофазного трансформатора напряжения измеряется по схеме, показанной на рис. 37,*а*.

Напряжение U_1 на первичной обмотке испытуемого трансформатора плавно увеличивается до тех пор, пока во вторичной обмотке, замкнутой на амперметр, установится вторичный ток I_2, близкий к номинальному. Сопротивление трансформаторов напряжения определяется по формуле

$$z_к = U_1 / I_2 n_{ном}.$$

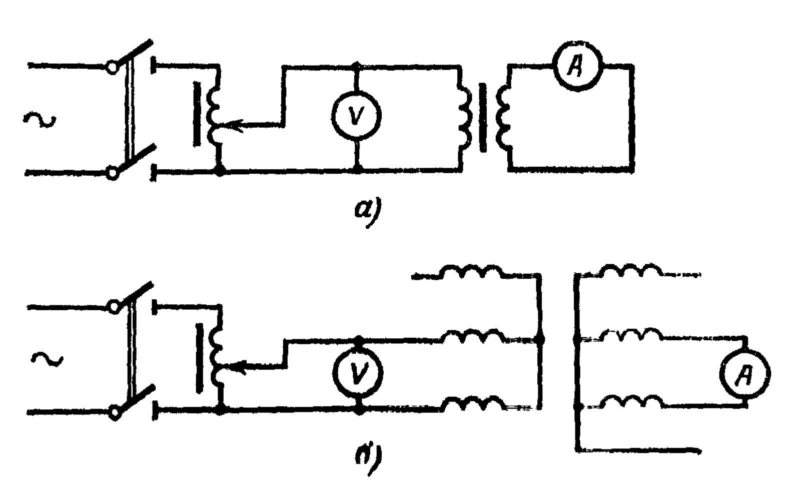


Рис. 37. Определение сопротивления трансформатора напряжения.

Сопротивление трехфазного трансформатора напряжения измеряется по схеме, показанной на рис. 37,*б*, и определяется по формуле

$$z_к = U_1 / 2 I_2 n_{ном}$$

Измерения производятся между фазами *AB*, *BC*, *CA* поочередно. Для расчета тока к. з. берется среднее из трех полученных значений.

Класс точности приборов, которыми производятся измерения, должен быть не ниже 0,5.

Проверка схем включения трансформаторов напряжения. Эта проверка выполняется под рабочим напряжением.

На ближайшей к трансформатору напряжения сборке зажимов измеряются напряжения на всех выводах вторичных обмоток и напряжения всех выводов относительно земли. По результатам этих измерений оценивается правильность соединений вторичных обмоток транс-

форматоров. Если фазные и междуфазные напряжения симметричны, а в цепи $3U_0$ измерено только $U_{нб}$ (около 1—3 В), то в схеме нет неправильно включенных (перевернутых по полярностям) обмоток.

Для проверки правильности наименования фаз (маркировки вторичных цепей) применяют либо пофазное отключение трансформатора напряжения со стороны ВН, либо определение фаз фазоуказателем.

Первый способ (*пофазное отключение трансформатора напряжения*) дает во всех случаях безошибочный результат, так как на отключенной фазе напряжение либо исчезает, либо понижается (например, как на векторной диаграмме, приведенной на рис. 34,*в*). Однако он применим только при наличии в первичной цепи трансформатора напряжения однофазных разъединителей или предохранителей. Вместо отключения со стороны ВН можно пофазно отключать вторичные цепи непосредственно на выводах НН трансформатора напряжения. При этом результаты измерений получаются более четкими, но вероятность ошибки повышается.

Второй способ (*определение фаз фазоуказателем*) требует заземления во вторичных цепях фазы (обычно заземляют фазу *b*). Если в схеме заземлен нуль, а не фаза, то на время проверки по второму способу заземление следует перенести на фазу *b*.

Так как наименование заземленной фазы известно по результатам измерения напряжений фаза — земля, то, определив чередование фаз фазоуказателем, можно легко проверить правильность маркировки двух других фаз.

Для трехобмоточных трансформаторов напряжения 35 кВ и выше с выведенными замкнутыми вершинами разомкнутого треугольника (см. рис. 27, 28, 29) с целью проверки правильности сборки разомкнутого треугольника производится графическое построение потенциальной диаграммы (см. рис. 27,*б*, 28,*б* и 29,*б*) по результатам измерений напряжения между каждым из выводов разомкнутого треугольника и всеми фазами и нулем звезды.

Пример построения точек *и*, *ф* потенциальной диаграммы разомкнутого треугольника для схемы на рис. 28,*а* показан на рис. 38, где каждая из этих точек построена по результатам измерений двух напряжений. Результаты остальных измерений следует использовать как контрольные.

Все измерения, необходимые для построения потенциальной диаграммы, должны производиться на сборке зажимов, ближайшей к трансформатору напряжения (в шкафу, в который приходят кабели от всех трех фаз трансформатора напряжения). Для трансформаторов напряжения, у которых выведена только одна вершина разомкнутого треугольника — провод *и* (как в схеме рис. 27,*а*) следует выполнять измерения и для построения на потенциальной диаграмме точки, соответствующей невыведенной вершине треугольника.

Следует обращать особое внимание на правильность маркировки выводов *н* и *к* (или *b*) цепи $3U_0$, имеющих одинаковые потенциалы по отношению ко всем другим выводам трансформатора напряжения. Для ее проверки измеряется напряжение каждого из этих выводов на землю. Напряжение вывода *к* (или *b*) на землю должно быть равно нулю, а вывода *н* — напряжению небаланса цепи $3U_0$. При этом для правильного построения потенциальной диаграммы необходимо проверить на сборке зажимов, от какой фазы трансформатора напряжения приходит заземленный конец цепи $3U_0$.

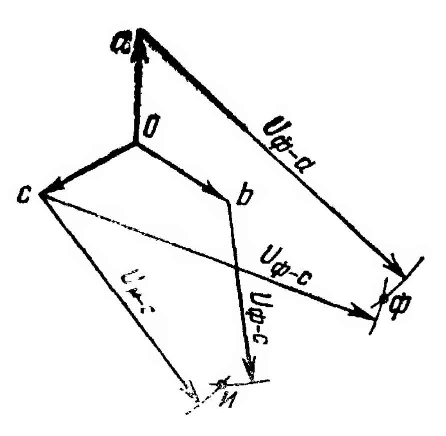


Рис. 38. Построение потенциальной диаграммы на выводах трансформатора напряжения.

Следует иметь в виду, что ошибочные маркировка и установка заземления в цепи $3U_0$ приводят к неправильному включению органов направления защиты от замыканий на землю и, как следствие этого, к ее неправильным действиям при к. з. в защищаемой сети.

Проверка правильности маркировки в схеме вторичных цепей ведется под рабочим напряжением с помощью вольтметра и фазоуказателя. Для цепей напряжения трехобмоточных трансформаторов 35 кВ и выше дополнительно снимается потенциальная диаграмма и измеряется напряжение выводов цепи $3U_0$ на землю.

Проверку маркировки вторичных цепей начинают с шинок на щите и затем выполняют на сборках выводов каждой панели, на которую подается напряжение от проверяемого трансформатора напряжения.

Фазировка трансформаторов напряжения. Для фазировки необходимо соединить вторичные обмотки трансформаторов в любой точке. Обычно такое соединение обеспечивается заземлением вторичных обмоток. Вольтметром измеряют напряжение между каждым выводом одного трансформатора и всеми выводами второго. При включении вольтметра на одноименные выводы его показание должно быть равно нулю. Фазировка проверяется на контактах всех реле-повторителей, рубильниках, блок-контактах и прочих аппаратах, переключающих цепи напряжения защиты, автоматики и измерительных приборов с одного трансформатора на другой.

Цель фазировки — убедиться в том, что при переводе переключающего аппарата из одного положения в другое к реле и измерительным приборам подводятся одноименные фазы напряжения от разных трансформаторов.

Фазировка цепей разомкнутого треугольника производится только в части выводов *и*, *ф*, *к* (или *b*). Фазировать выводы *н* не требуется.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Дымков А. М., Кибель В. М., Тишенин Ю. В.** Трансформаторы напряжения. М., «Энергия», 1975. 200 с.

2. **Руководящие указания по релейной защите.** Вып. 3. Защита шин 6—220 кВ станций и подстанций. М.—Л., Госэнергоиздат, 1961. 72 с.

3 **Федосеев А. М.** Релейная защита электрических систем. М.—Л., «Энергия», 1976. 559 с.

4. **Гельфанд Я. С.** Релейная защита распределительных сетей М., «Энергия», 1975. 328 с.

5. **Голубев М. Л.** Расчет уставок релейной защиты и предохранителей в сетях 0,4—35 кВ. М., «Энергия», 1969. 134 с.

6. **Подгорный Э. В., Хлебников С. Д.** Моделирование и расчеты переходных режимов в цепях релейной защиты. М., «Энергия» 1974. 206 с.

7. **Трансформаторы напряжения.** ГОСТ 1983-67 (Введен 1/I 1968). М., 14 с.

СОДЕРЖАНИЕ